

Université de Montréal

Mécanismes de contrôle du mouvement humain lors du port de  
verres à foyer progressif

par

David Tinjust

Département de kinésiologie

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de Doctorat (Ph.D.)  
en science de l'activité physique

septembre 2006

© David Tinjust, 2006





**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

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

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

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

**NOTICE**

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

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

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

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée

**Mécanismes de contrôle du mouvement humain lors du port de  
verres à foyer progressif**

présentée par:

David Tinjust

a été évalué(e) par un jury composé des personnes suivantes :

Président-rapporteur  
Yvan Girardin

Luc Proteau  
Directeur de recherche

Jocelyn Faubert  
Codirecteur

Julie Messier  
Membres du jury

Claude Dugas  
Examineur externe

Représentant du doyen de la FES  
Yvan Girardin

## Résumé

L'être humain est en permanence en interaction avec son environnement. Il doit cependant adapter ses mouvements aux contraintes perceptivo-motrices qui peuvent varier d'un contexte à un autre. Un certain nombre d'expériences d'adaptation visuo-motrice ont démontré que le système visuo-moteur était capable de développer des mécanismes permettant de conformer nos mouvements à l'exigence perceptive de certaines situations atypiques. La procédure utilisée dans ces études consiste généralement à induire un biais perceptif important afin d'évaluer la manière dont ce biais est pris en charge par les mécanismes de planification et de contrôle du mouvement. Lors de ces études, on observe généralement la mise en place d'un nouveau modèle interne. Cependant, les distorsions imposées dans ces études sont généralement importantes et linéaires. Il était donc important d'évaluer les mécanismes de planification/contrôle et les adaptations potentielles pouvant se mettre en place lorsque des distorsions subtiles et multiples étaient générées au sein de l'espace de travail. Nous avons pour cela utilisé un modèle expérimental reposant sur l'utilisation de verres progressifs. Ce modèle était intéressant au niveau théorique mais également au niveau clinique car la majorité des individus presbytes portent des verres progressifs et certains problèmes d'acclimatations d'ordre visuo-moteur sont rapportés au sein de cette population. Les résultats de nos expériences conduites avec des participants jeunes ont montré qu'en présence des afférences visuelles dynamiques, le système visuo-moteur était capable de compenser les distorsions générées par les verres progressifs et ceci sans la mise en place d'un nouveau modèle interne. Lors de l'expérience 4, les mécanismes

obtenus chez les jeunes ont été reproduits au sein d'une population de personnes âgées et même dans une condition induisant des distorsions dynamiques. Ce qui montrait que les mécanismes de contrôle impliqués pour compenser ce type de perturbation demeuraient efficaces avec le vieillissement. Contrairement aux résultats obtenus lorsque les afférences visuelles étaient disponibles, nos conditions sans vision dynamique montraient la mise en place d'un nouveau modèle interne spécifique de la perturbation imposée. Ce qui suggérait clairement une stratégie de contrôle différente et spécifique de la condition visuelle utilisée lors du port de verres progressifs.

Mots clés : distorsions, verres progressifs, contrôle du mouvement. afférences sensorielles, adaptations visuo-motrices, vieillissement.

## Summary

Humans are perpetually in interaction with their environment. We must, however, adapt our movements to the perceptual-motor constraints that can vary from one context to another. A certain number of experiments of visual-motor adaptation have demonstrated that the visual-motor system is able to develop mechanisms that adapt our movements to the perceptual requirements of certain atypical contexts. The procedure used in these studies consists of inducing an important perceptual bias in order to evaluate the way in which mechanisms of motor planning and control can compensate for perceptual distortion during reaching movements. In these studies, the implementation of new internal models is generally observed. However, the distortions induced in such studies are generally important and linear. It was therefore important to evaluate the mechanisms of motor planning/control, and the potential for adaptation, when *subtle* and *multiple* distortions are generated within the workspace. We used an experimental model based on those used for progressive lenses. The use of this model was of interest at both theoretical and clinical levels because the majority of the presbyopic individuals wear progressive lenses. Furthermore, some visual-motor adaptation problems are reported within this population. The results of our experiments with young participants showed that in the presence of the visual dynamic reafference, the visual-motor system was able to compensate for the distortions generated by progressive lenses, and this, without the implementation of a new internal model. In an additional experiment, the results obtained in the younger group were reproduced (1) within a population of older participants and, (2) under conditions inducing dynamic distortions. Our results demonstrated that the

mechanisms of control implemented to compensate for progressive lens-induced distortions remained intact and effective even for older participants. Alternatively, results obtained when the visual reafference was not available showed the elaboration of a new specific internal model resulting from the optical distortion induced by the progressive lenses. These results suggest a different strategy of control that is specific to the visual condition of the task during progressive glasses wear.

**Key words:** progressive lenses, distortions, motor control, sensory reafference, visuo-motor adaptation, ageing.



Table des matières	
Résumé	i
Summary	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xvi
Liste des abréviations	xxiii
Remerciements	xxiv
Chapitre 1	i
Introduction générale et revue de la littérature	i
Introduction générale	2
Revue de la littérature	4
Localisation de la cible	4
Localisation du point de départ du mouvement	7
Transformations sensorimotrices	10
Planification vectorielle du mouvement	12
Modèles et principes de contrôle du mouvement	16
Corrections de type discret	17
Corrections de type continu	19
Adaptations perceptivo-motrices	25

Adaptation à des distorsions visuelles et optiques _____	25
Adaptation à une distorsion inertielle _____	30
Contexte de la thèse _____	32
Bibliographie _____	35
Chapitre 2 _____	42
Méthodologie _____	42
Méthodologie générale _____	43
La tâche _____	43
Configuration expérimentale et appareillage _____	43
Procédure _____	45
Acquisition des données _____	46
Description des figures et tableaux _____	47
Chapitre 3 _____	48
Contrôle du mouvement pour une tâche contrainte de manière spatiale. _____	48
Introduction _____	49
Méthodologie _____	55
Positions et tailles des cibles _____	55
Groupes expérimentaux et condition de pratique _____	56
Phases expérimentales. _____	57
Résultats _____	58
Proportion d'atteinte de cible et essais comportant des corrections discrètes _____	58

Corrections directionnelles efficaces sur la composante orientation du mouvement	84
Discussion	87
Modulation de la première impulsion lors d'une tâche contrainte de manière spatiale	87
La planification du mouvement est un processus imprécis	88
Contrôle en temps réel : modulation du mouvement et corrections discrètes	89
Différentes stratégies pour les tâches contraintes de manière temporelle ou spatiale	92
Bibliographie	97
Chapitre 4	100
Contrôle du mouvement lors du port de verres à foyer progressif.	100
Introduction	101
Méthodologie	106
Critères d'inclusion et bilan optométrique	107
Prescription des verres, choix des montures et ajustements	108
Position de la base de départ	108
Position des cibles	109
Groupes expérimentaux	109
Groupe vision-normale/distorsion	110
Groupe cible-seule/distorsion	110

Groupe plano	110
Groupe vision-normale	111
Décours expérimental	111
Résultats	112
Acquisition tôt/acquisition tard/recouvrement	113
Acquisition tard/ post-test vision	119
Acquisition tard/ post-test cible-seule	121
Planification et contrôle du mouvement pour le groupe cible-seule/distorsion	123
Résumé	125
Expérience 3	126
Résultats	127
Acquisition tôt/acquisition tard/recouvrement	127
Acquisition tard/ post-test vision-normale	131
Acquisition tard/ post-test cible-seule	133
Discussion	138
Compensation des distorsions complexes	138
Altération de la planification en l'absence des informations visuelles	139
Bibliographie	142
Chapitre 5	145
Contrôle du mouvement, verres progressifs et vieillissement	145
Introduction	146

Matériel, méthode et participants _____	156
Participants _____	156
Position de l'écran _____	157
Position des cibles _____	158
Conditions expérimentales et procédures _____	159
Analyses _____	161
Résultats _____	162
Condition statique _____	162
Condition dynamique (condition avec rotation de la tête) _____	169
Résumé _____	173
Planification de la première impulsion et distorsions optiques dynamiques ____	174
Modulation de la première impulsion et distorsions optiques dynamiques _____	175
Mécanismes de contrôle, seuil de variabilité et changements spatiaux _____	177
Expérience 5 _____	178
Matériel et Méthode _____	179
Positions de cible _____	179
Phases expérimentales _____	180
Groupes expérimentaux _____	181
Résultats _____	182
Protocole de localisation fovéale _____	182
Protocole de localisation périphérique _____	191

Résultats	191
Discussion	199
Une planification imprécise	199
Compensation optimale des biais perceptifs en présence des afférences visuelles	200
Conflits visuo-proprioceptifs et effet sur le mouvement	202
Mécanismes de contrôle inconscients et automatiques	202
Conclusion	203
Bibliographie	205
Discussion générale	208
Contrôle continu du mouvement lors du port de verres progressifs	208
Stratégie de contrôle et afférences sensorielles	212
Les mécanismes de contrôle en temps réel restent efficaces lors du vieillissement	215
Adaptabilité des mécanismes de contrôle	217
La planification n'est pas un processus précis	219
Conclusion générale	223
Bibliographie générale	224
Annexe A	I
Annexes B	XVII

## Liste des tableaux

### Chapitre 4

Tableau 1. Description des phases expérimentales en fonction des conditions perceptives et de la connaissance du résultat (CR).....111

Tableau 2a. Synthèse des données de précision spatiale de l'expérience 3 lors de l'acquisition et du recouvrement.....128

Tableau 2b. Synthèse des données de précision spatiale de l'expérience 2 lors de l'acquisition et du recouvrement (à titre comparatif).....128

### Chapitre 5

#### Expérience 4

Tableau 1a. Synthèse de la précision spatiale pour l'ensemble des cibles au sein des groupes expérimentaux jeune et âgé lors des deux phases (avec et sans lunettes) de la condition expérimentale statique.....162

Tableau 1b. Synthèse de la précision spatiale pour l'ensemble des cibles au sein des groupes expérimentaux jeune et âgé lors des deux phases (avec et sans lunettes) de la condition expérimentale dynamique.....169

#### Expérience 5

Tableau 4a. Synthèse de la précision spatiale et des temps de mouvements des cibles initiales au sein du groupe vision-normale durant l'acquisition et la phase de transfert du protocole de localisation fovéale.....183

Tableau 4b. Synthèse de la précision spatiale et des temps de mouvements des cibles initiales au sein du groupe cible-seule durant l'acquisition et la phase de transfert du protocole de localisation fovéale.....	184
Tableau 6. Tableau exprimant en pourcentage l'occurrence spatiale des cibles secondaires par rapport aux données références des cibles inférieures initiales (en mm). Les données des cibles secondaires sont contrastées au pourcentage de perturbations imposés (protocole de localisation fovéale) .....	188
Tableau 7a. Synthèse de la précision spatiale et des temps de mouvements des cibles initiales au sein du groupe vision-normale durant l'acquisition et la phase de transfert du protocole de localisation périphérique.....	192
Tableau 7b. Synthèse de la précision spatiale et des temps de mouvements des cibles initiales au sein du groupe cible-seule durant l'acquisition et la phase de transfert du protocole de localisation périphérique.....	193
Tableau 9. Tableau exprimant en pourcentage l'occurrence spatiale des cibles secondaires par rapport aux données références des cibles inférieures initiales (en mm). Les données des cibles secondaires sont contrastées au pourcentage de perturbations imposés (protocole de localisation périphérique) .....	196

## Annexe A

Tableau 3a. Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle, des coefficients de variabilité et de la déviation du vecteur aux différents marqueurs cinématiques lors de l'expérience 3 durant les phases d'acquisition et de recouvrement. Valeurs obtenues pour les cibles latérales .....	VII
--	-----



- Tableau 3b. Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle, des coefficients de variabilité et de la déviation du vecteur aux différents marqueurs cinématiques lors de l'expérience 3 durant les phases d'acquisition et de recouvrement. Valeurs obtenues pour les cibles axiales.....VIII
- Tableau 4. Synthèse de la précision spatiale des cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).....IX
- Tableau 5a. Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques pour les cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).....XI
- Tableau 5b. Occurrence temporelle aux différents marqueurs cinématiques pour les cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).....XIII
- Tableau 5c. Coefficients de variabilité aux différents marqueurs cinématiques pour les cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).....XV

## Annexe B

- Tableau 2a. Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les participants jeunes et âgés de la condition statique (condition sans lunettes).....XVII
- Tableau 2b. Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les

participants jeunes et âgés de la condition statique (condition avec lunettes).....	XVIII
Tableau 3a. Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les participants jeunes et âgés de la condition dynamique (condition sans lunettes).....	XIX
Tableau 3b. Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les participants jeunes et âgés de la condition dynamique (condition avec lunettes).....	XX
Tableau 5a. Tableau de synthèse de la précision spatiale, des temps de mouvement et de l'occurrence spatiale des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation fovéale. Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont présentées.....	XXI
Tableau 5b. Tableau de synthèse l'occurrence temporelle des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation périphérique. Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont présentées.....	XXIV
Tableau 8a. Tableau de synthèse de la précision spatiale, des temps de mouvement et de l'occurrence spatiale des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation fovéale. Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont présentées.....	XXVI
Tableau 8b. Tableau de synthèse l'occurrence temporelle des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation périphérique.	

Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont  
présentées.....XXIX

## Liste des figures

### Chapitre 2

Figure 1. Illustration du montage expérimental en configuration verticale ainsi que la position des cibles présentées.....43

### Chapitre 3

Figure 1. Illustration du montage expérimental en configuration verticale ainsi que la position des cibles présentées.....55

Figure 2. Déviation en millimètre par rapport au vecteur de référence à l'occurrence des différents marqueurs cinématiques au sein des groupes vision-normale (à gauche) et cible-seule (à droite) pour les cinq positions de cible. Les résultats ont été enregistrés tôt et tard lors de l'acquisition (partie supérieure et médiane de la figure) et lors de la phase de transfert (partie inférieure).....63

Figure 3. Variabilité intra-sujet (en mm) et coefficient de variabilité sur l'orientation aux différents marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération et fin du mouvement). La partie supérieure de la figure illustre les résultats enregistrés tôt dans l'acquisition, la partie médiane représente les résultats obtenus en fin d'acquisition et la partie inférieure correspond aux résultats de la phase de transfert. Les graphiques illustrent les résultats des groupes vision normale (VN) et cible-seule (CS) pour les grandes (carré) et les petites cibles (triangle).....65

Figure 4. La partie supérieure de la figure représente l'occurrence spatiale des différents marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération et fin du mouvement) pour les conditions de vision-normale (cercle ouvert) et de cible-seule (cercle fermé) lors de l'acquisition (tôt et tard) et du transfert. Les autres

parties de la figure représentent l'occurrence temporelle des marqueurs cinématiques pour les petites et les grandes cibles des groupes vision-normale et cible-seule lors de l'acquisition et du transfert.....71

- Figure 5. Variabilité intra-sujet (en mm) et coefficient de variabilité sur l'étendue aux différents marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération et fin du mouvement). La partie supérieure de la figure illustre les résultats enregistrés tôt dans l'acquisition, la partie médiane représente les résultats obtenus en fin d'acquisition et la partie inférieure correspond aux résultats de la phase de transfert. Les graphiques illustrent les résultats des groupes vision normale (VN) et cible-seule (CS) pour les grandes (carré) et les petites cibles (rond). La vignette en haut à droite représente les données obtenues par Proteau et Isabelle (2002) lors de leur tâche contrainte de manière temporelle pour leurs 4 groupes expérimentaux (VN et CS pour les petites et grosses cibles).....72
- Figure 6. Variabilité intra-sujet et coefficient de variabilité sur l'orientation (portion inférieure de la figure) et sur l'étendue (portion supérieure de la figure) à chaque marqueur cinématique pour les essais avec (cercle ouvert) et sans correction discrète (cercle fermé).....79
- Figure 7. Occurrence spatiale, variabilité intra-sujet et coefficient de variabilité aux différents marqueurs cinématiques sur les composantes étendue (partie gauche de la figure) et orientation (partie droite de la figure) du mouvement. Données relatives aux impulsions de correction obtenues lors de l'acquisition au sein du groupe petite-cible/vision.....81
- Figure 8. Proportion d'essais ayant montrés une correction discrète sur l'orientation du mouvement. Données obtenues lors de l'acquisition et le transfert pour les grandes cibles (carré) et les petites cibles (rond) en condition de vision normale

(VN) et de cible-seule (CS). Les données ont été obtenues pour chaque cible et prises à trois moments cinématiques différents (entre le pic d'accélération et le pic de vitesse; entre le pic de vitesse et le pic de décélération; entre le pic de décélération et la fin du mouvement).....84

Figure 9. Figure comparative des données de précision spatiale (erreur constante) sur l'étendue (portion supérieure de la figure) et sur l'orientation (portion inférieure de la figure) entre l'expérience 1 et les données de Proteau et Isabelle (2002). Les données ont été obtenues lors des phases d'acquisition et de transfert pour les grandes cibles (carré) et les petites cibles (rond) en condition de vision normale (VN) et de cible-seule (CS).....93

## Chapitre 4

### Expérience 2

Figure 1. Représentation d'un verre progressif et des différentes zones de vision, de distorsions et d'aberrations optiques. Le centre optique, le couloir de progression ainsi que les positions des quatre cibles utilisées sont représentés.....101

Figure 2. représentation des trois zones de vision pouvant être affectées par le port de tête lorsque des verres progressifs sont portés.....102

Figure 3. Montage expérimental et position des cibles par rapport au champ visuel supérieur et inférieur.....106

Figure 4. Coefficient de variabilité sur l'étendue aux différents marqueurs cinématiques pour les phases acquisition tôt-acquisition tard- recouvrement et selon les quatre positions de cible utilisées.....117

Figure 5. Erreur constante (EC) sagittale obtenue pour les quatre positions de cible lors de l'acquisition et du post-test en condition cible seule au sein du groupe cible-seule/distorsion.....121

Figure 6. Occurrence spatiale (en mm) aux différents marqueurs cinématiques pour les deux cibles latérales (tard dans l'acquisition et durant le post-test en condition cible-seule/sas distorsion) au sein du groupe cible-seule/distorsion. Les valeurs moyennes et les écart-types sont représentés.....124

### Expérience 3

Figure 7. Erreur constante (EC) sagittale obtenue pour les quatre positions de cible lors de l'acquisition et du post-test en condition cible seule au sein du groupe cible-seule/distorsion.....133

Figure 8. Occurrence spatiale (en mm) aux différents marqueurs cinématiques pour les deux cibles latérales (tard dans l'acquisition et durant le post-test en condition cible-seule/sas distorsion) au sein du groupe cible-seule/distorsion. Les valeurs moyennes et les écart-types sont représentés.....135

Figure 9. Coefficients de variabilité obtenus pour les deux cibles latérales lors des phases d'acquisition et de post-test en condition cible-seule/sans distorsion.....136

## Chapitre 5

### Expérience 4

- Figure 1. représentation des trois zones de vision pouvant être affectées par le port de tête lorsque des verres progressifs sont portés.....151
- Figure 2. Représentation d'un verre progressif et des différentes zones de vision, de distorsions et d'aberrations optiques. Le centre optique, le couloir de progression ainsi que les positions des deux cibles utilisées sont représentés.....152
- Figure 3. Représentation de la déformation d'une grille vue à travers des verres progressifs lors de rotations de la tête à droite ou à gauche. Les zones de distorsions maximales sont montrées dans les portions inféro-latérales.....153
- Figure 4. Montage expérimental et position des cibles par rapport au champ visuel supérieur et inférieur.....156
- Figure 5. Représentation de la direction du regard lors des rotations de la tête. Représentation d'un participant vue de dos lors d'une rotation de la tête et des bornes restreignant la rotation de la tête.....158
- Figure 6. Coefficient de variabilité aux différents marqueurs cinématiques obtenus pour les participants jeunes de l'expérience 2 et 4 ainsi que pour les personnes âgés de l'expérience 4.....166



## Expérience 5

Figure 7. Représentation des quatre positions de cible initiales et de la base de départ. Les positions des cibles secondaires correspondant aux perturbations de 7.5 %, 10.8 % et 14.2 % sont également représentées.....178

## Annexe A

Figure 10. Précision spatiale sagittale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 2.....I

Figure 11. Précision spatiale latérale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 2.....II

Figure 12. Précision spatiale sagittale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 3.....III

Figure 13. Précision spatiale latérale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 3.....IV

- Figure 14. Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience 2 pour les cibles axiales.....V
- Figure 15. Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience 2 pour les cibles latérales.....V
- Figure 16. Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience 3 pour les cibles axiales.....VI
- Figure 17. Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience pour les cibles latérales.....VI

## Liste des abréviations

VD : vision/distorsion

VN : vision-normale

CS : cible-seule

PL : plano

mm: millimètre

ms: milliseconde

EC: erreur constante

EV: erreur variable

CEV : coefficient de variabilité sur l'étendue

COV : coefficient de variabilité sur la direction

CR : connaissance du résultat

TM : temps de mouvement

SNC: système nerveux central

acc : accélération

vélo : vélocité

déc : décélération

fin : fin du mouvement

## Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Luc Proteau, ainsi que mon co-directeur Jocelyn Faubert de m'avoir permis de mener mes travaux de recherche au sein de leurs laboratoires. Je remercie également mon père qui m'a toujours soutenu et motivé. J'ai une pensée toute particulière pour ma mère qui a été pour moi un exemple et un guide. Merci également à Corinne Ninfort, la femme de ma vie, qui est toujours présente pour moi et ce, depuis 14 ans.

Je remercie également tous les autres membres de ma famille ainsi que tous les membres du laboratoire pour leur aide et leurs encouragements. Je tiens également à dire un merci particulier à Anteneh Argaw et Isabelle Legault pour leur aide technique. Finalement, je remercie le CRSNG, Essilor International et le COETF pour leur soutien financier.

## Chapitre 1

### Introduction générale et revue de la littérature

## Introduction générale

Dans notre quotidien, nous sommes amenés à produire des mouvements d'atteinte manuelle. Ces gestes anodins, répétés régulièrement, peuvent être vus comme des actes moteurs automatiques, ce qui n'est cependant pas le cas. En fait, même un geste que l'on a l'habitude de répéter chaque jour dépend d'une succession de processus allant de la prise d'information permettant de localiser l'objet convoité à la production de commandes motrices. Les mécanismes menant à la planification et au contrôle d'un mouvement volontaire ne sont pas encore parfaitement élucidés. Cependant, depuis les travaux pionniers de Woodworth (1899), de grandes avancées ont été faites dans la compréhension de ces processus. Un mouvement volontaire est un acte moteur orienté vers un but pour lequel les substrats pertinents et nécessaires à la production du geste sont extraits de l'environnement ou issus d'informations sensorielles intrinsèques. Selon le but de l'action, les différentes informations recueillies par nos capteurs sensoriels vont permettre la planification de la commande motrice adéquate. Cette commande motrice, ou programme moteur, contient des éléments constants par rapport à la classe de mouvements à laquelle appartient l'action; il y a aussi des aspects paramétrables relatifs aux éléments contextuels (Schmidt, 1975).

Étant donné la grande variété de contextes auxquels nous sommes confrontés, il est nécessaire de nous adapter en permanence aux contraintes perceptivo-motrices que nous impose notre environnement. La présente thèse a pour objectif d'étudier ces mécanismes adaptatifs ainsi que les mécanismes de contrôle en temps réel de mouvement lors de

contextes perceptifs particuliers. Spécifiquement, nous allons évaluer l'impact d'un environnement non constant en termes perceptifs, sur la planification et le contrôle d'un mouvement d'atteinte manuelle. Ce type d'environnement non homogène fait partie du quotidien de nombreux d'entre nous puisqu'il peut être induit par le port de lunettes dites « à foyer progressif » dont la puissance optique varie d'un point de la lentille à un autre.

## Revue de la littérature

Préalablement à tout mouvement d'atteinte manuelle, il se produit une étape fondamentale qui se caractérise par l'encodage des éléments pertinents et nécessaires à la planification du mouvement. Un mouvement volontaire étant un geste orienté vers un but, il est donc fondamental de localiser l'objet à atteindre mais également de déterminer la position spatiale d'où est amorcé le mouvement.

### Localisation de la cible

Dans le cadre d'un mouvement d'atteinte manuelle, la planification du mouvement repose en grande partie sur la disponibilité des informations permettant la localisation de l'objet à atteindre. La localisation rétinienne de la cible, la position des yeux dans les orbites ainsi que la position de la tête par rapport au tronc (informations proprioceptives nucales) sont les trois types d'information participant à la bonne localisation d'une cible visuelle dans l'espace (Rossetti, Tadary, & Prablanc, 1994). La combinaison de ces informations permet l'élaboration d'une représentation spatiale d'un objet dans un cadre de référence égocentrique. Différentes études ont montré l'utilité de ces trois sources d'information sensorielle. En effet, dans un cadre comportemental visuo-moteur, les informations rétinienne ne sont pas suffisantes pour permettre une localisation optimale de l'objet à atteindre. Dans un protocole évaluant l'implication des informations extra-réiniennes, Bock (1986) demandait à des participants de faire un pointage manuel dans le noir en direction de l'orientation de leurs yeux ou dans une seconde condition vers un point lumineux. Bien qu'il y avait une corrélation entre la position des yeux et la précision spatiale terminale du mouvement dans la première



condition, on observait une plus grande dispersion des positions finales du pointage comparativement à la condition où un indice visuel était fourni (i.e., le point lumineux). Ces données supportent l'importance de la combinaison des informations rétiniennes et extra-rétiniennes pour la localisation spatiale d'une cible. Prablanc, Pelisson et Goodale (1986) ont également rapporté des résultats suggérant une interaction entre les signaux rétiniens et extra-rétiniens. Leurs participants devaient, suite à une saccade, effectuer un pointage vers une cible visible ou vers une cible mémorisée et cela sans avoir la possibilité de voir leur bras. La précision était moindre dans la condition de cible mémorisée. Ce résultat montre bien la nécessité d'une mise à jour de la position de la cible via l'information rétinienne pour obtenir une bonne localisation de la cible à atteindre et ceci en cohérence avec la position de l'œil dans l'orbite (Prablanc et al., 1986).

Au niveau clinique, un phénomène observé lors de paralysies oculomotrices myogéniques illustre parfaitement l'importance de cette combinaison dans la production d'un geste d'atteinte manuelle précis. En effet, on note des gestes d'atteinte manuelle hypermétriques chez les patients atteints de telles paralysies. Ce phénomène, appelé "past-pointing", résulte d'efférences oculomotrices erronées et engendrées par une hyper-contraction compensatrice observée au sein du muscle synergique de l'œil sain. Dans ces cas de figure, les signaux renseignant sur la position orbitaire des yeux sont inexacts, ce qui affecte la représentation interne de la position de la cible et donc le mouvement préparé pour atteindre celle-ci.

Ce phénomène de past-pointing a également été révélé lors d'expériences combinant la perturbation de la proprioception nucale et le pointage manuel. Biguer,

Donaldson, Hein et Jeannerod (1988) utilisèrent un protocole d'altération de la proprioception par mode vibratoire lors d'une tâche de pointage afin d'évaluer l'implication des informations proprioceptives nucales dans la localisation spatiale. Les participants devaient effectuer un pointage sur une table sans voir le déplacement de leur main. La cible vers laquelle les mouvements étaient effectués était au centre de la table et alignée à l'axe sagittal médian des participants. Pour un certain nombre d'essais, des vibrations (100 Hz; 300  $\mu$ m) étaient appliquées sur le côté gauche de la nuque. Pour neuf des dix participants, les résultats des pointages montrèrent une déviation moyenne à droite de la cible (de  $0.5^{\circ}$  à  $8^{\circ}$ ). De plus, le sens et l'importance de ces déviations correspondaient aux illusions visuelles perçues par les participants. En effet, les participants percevaient des illusions de mouvements de la cible du côté opposé aux vibrations. Les erreurs obtenues lors du pointage manuel suggèrent que ces informations renseignant sur la position de la tête par rapport au tronc sont des éléments importants dans les processus de planification d'un mouvement. Ce type de données montrant l'importance de la proprioception nucale dans la localisation spatiale d'un objet a d'ailleurs été reproduit à plusieurs reprises (Rossetti, Tadary, & Prablanc, 1994; Han & Lennerstrand, 1999).

La localisation spatiale de l'objet à atteindre n'est cependant pas le seul élément intervenant dans les processus de planification d'un mouvement. En effet, les informations concernant l'état et la position initiale de l'effecteur impliqué dans l'action semblent également intervenir dans l'élaboration des commandes motrices d'un geste visuo-guidé.

### Localisation du point de départ du mouvement

Les afférences concernant la position initiale de l'effecteur peuvent provenir à la fois de sources proprioceptives et visuelles. Certaines données expérimentales indiquent que ces informations concernant le point d'amorce du mouvement permettent une meilleure planification du mouvement. Prablanc, Echallier, Jeannerod et Komilis (1979) ont justement voulu évaluer si la vision de sa main avant d'effectuer un mouvement influençait la précision de celui-ci. Ces auteurs ont utilisé une tâche visuo-guidée dans laquelle deux conditions différentes étaient imposées quant à la visibilité de la main avant le mouvement. La première condition appelée "full open loop" ne permettait aucunement au participant de voir sa main. La seconde condition appelée "dynamic open loop" permettait la vision de la main en position statique avant le mouvement. Les résultats de cette étude montraient une précision du mouvement significativement plus élevée et une variabilité significativement moins élevée dans la condition où la vision de la main avant le mouvement était permise. La comparaison de la précision spatiale de ces deux conditions expérimentales suggère que voir sa main avant d'effectuer un mouvement optimise les mécanismes d'intégration de la position de cet effecteur dans l'espace. Ceci favoriserait une meilleure précision du mouvement du fait d'une meilleure planification. De plus, une étude suggère que cette meilleure précision du mouvement ne résulte pas de l'effet positif de la vision simultanée de la position initiale de l'effecteur et de la cible.

En effet, Desmurget, Rossetti, Jordan, Meckler et Prablanc (1997) ont évalué si la vision ou la non-vision de la main pouvait influencer la précision d'un pointage

manuel vers une cible non visible (en l'occurrence la main controlatérale). Leurs résultats ont montré qu'indépendamment de la disponibilité visuelle de la cible à atteindre, voir la position de sa main avant d'effectuer un mouvement favorisait effectivement une meilleure précision du mouvement. L'ensemble des résultats montrant l'importance de voir sa main préalablement à l'amorce du mouvement ont été reproduits dans des conditions où la base de départ et la cible étaient successivement fovéalisées ou lorsque ces deux derniers éléments étaient vus simultanément dans le champ visuel (Rossetti, Stelmach, Desmurget, Prablanc, & Jeannerod, 1994; Vindras, Desmurget, Prablanc, & Viviani, 1998; Bédard & Proteau, 2001).

Additionnellement au substrat visuel, une autre source d'information participe à l'intégration spatiale de la position initiale de la main. Effectivement, la proprioception semble aussi impliquée dans les processus permettant d'inférer l'état et la position initiale de l'effecteur. Larish, Volp et Wallace (1984) utilisèrent un protocole où les signaux proprioceptifs étaient altérés par un système vibratoire. Dans leur étude, des vibrations étaient appliquées au niveau du biceps et ceci avant l'amorce d'un mouvement de positionnement impliquant l'articulation du coude. Pour les essais où les vibrations étaient générées, les participants n'arrivaient pas à reproduire le mouvement qui avait été initialement appris. Ce résultat montre l'importance de l'encodage de l'état initial de l'effecteur dans l'élaboration d'une planification adéquate d'où résulterait une meilleure précision du mouvement.

Des études impliquant des patients avec des troubles proprioceptifs confirment également l'importance de cette source d'information dans la planification du mouvement (Gordon, Ghilardi, & Ghez, 1995; Ghez, Gordon, & Ghilardi, 1995b). Dans

ces études, des patients ayant une neuropathie sensorielle devaient effectuer des pointages en direction de cibles (réparties sur 360 degrés) disposées sur un cercle. Comparativement au groupe contrôle, de plus grandes erreurs étaient observées chez les patients. De plus, ils produisaient des mouvements hypermétriques dans l'axe de moindre inertie de l'effecteur utilisé. Ces mouvements hypermétriques étaient abolis lorsque l'on autorisait les patients à voir leur bras préalablement à l'amorce du mouvement. Ces résultats montrent que la proprioception permet de fournir des données fondamentales sur la configuration initiale du bras. Les informations proprioceptives sont donc nécessaires à la bonne planification du mouvement et peuvent être compensées partiellement par la vision en cas de pathologie ou d'altération artificielle de ces signaux efférents.

L'ensemble de ces résultats suggère que l'encodage de la position initiale de l'effecteur se fait par l'intégration d'informations visuelles et proprioceptives. Ces informations visuelles et proprioceptives doivent être combinées afin d'obtenir une intégration optimale. Cette intégration fonctionnelle est mise en avant dans une étude où l'aspect proprioceptif concernant la position initiale de l'effecteur était conservé tandis qu'un biais perceptuel généré par un prisme altérait la position vue de ce même effecteur sur la base de départ du mouvement (Rossetti, Desmurget, & Prablanc, 1995). Les résultats concernant la précision terminale des mouvements de pointage où le prisme déplaçait visuellement la position initiale de l'effecteur montrèrent un biais systématique en direction opposée à l'effet optique imposé. Cette étude souligne l'importance que revêt la vision de la position initiale de l'effecteur au sein des processus de planification du mouvement. Cependant, les biais obtenus dans cette expérience ne correspondaient

qu'au tiers de la perturbation imposée, ce qui suggère une implication de la proprioception dans ces mécanismes de planification. Ceci est d'ailleurs confirmé par le biais minime du vecteur très tôt dans le mouvement ( $0.9^{\circ}$  de déviation obtenus vs.  $6.2^{\circ}$  attendus).

### Transformations sensorimotrices

À la lumière de bon nombre de données expérimentales il apparaît clairement que deux types d'information cruciales sont nécessaires à une bonne planification du mouvement. Ces informations sont la position spatiale de la cible (afférences visuelles) et la position initiale de l'effecteur (afférences visuelles et proprioceptives). D'un point de vue intégratif, les informations relatives à ces deux éléments doivent être associées au sein d'un même référentiel puisqu'elles contribuent ensemble à l'élaboration des commandes motrices. Pour cela l'information extrinsèque concernant la cible doit être transposée dans le même cadre de référence que l'effecteur. Des transformations sensori-motrices vont alors se mettre en place selon la disponibilité visuelle du membre qui va effectuer le mouvement. Quand la main est visible avant l'amorce du mouvement, celle-ci est considérée dans un cadre de référence extrinsèque de même que pour la cible. Ainsi les deux référentiels permettant les étapes précoces de planification peuvent être associés dans un cadre de référence identique. La trajectoire serait alors établie au sein de ce cadre de référence, et ce, jusqu'au stade final de la planification permettant de dériver la trajectoire voulue en commandes motrices (Soechting & Flanders, 1989b; Soechting et al., 1992).

Dans le cas de figure où la main n'est pas visible avant l'exécution du mouvement, la représentation de celle-ci se fait dans un cadre de référence égocentrique (par intégration des informations proprioceptives). Les informations spatiales relatives à la cible restent quant à elles issues d'une source d'afférence sensorielle extrinsèque, en l'occurrence la vision. Des mécanismes de transformation vont alors devoir se mettre en place afin d'associer au sein d'un même cadre de référence la représentation de la cible et de l'effecteur. Ces étapes de transformation sont cruciales dans l'élaboration de commandes motrices cohérentes entre les deux référents (la cible et l'effecteur) à partir desquels la planification du mouvement est construite. Avant d'arriver à l'étape où l'objet à atteindre et l'effecteur impliqué dans l'action sont associés au sein d'un même cadre de référence, il y aurait une succession d'étapes intermédiaires de transformation de coordonnées (Kalaska & Crammond, 1995). Les modèles relatifs à ces transformations sensorimotrices varient selon la tâche utilisée où l'espace dans lequel la tâche est effectuée.

Il est assez bien accepté que les transformations sensorimotrices inhérentes à la planification se font par codages successifs de la cible et du mouvement à accomplir au sein de cadres de références extrinsèques ou intrinsèques (Soechting & Flanders, 1989a, 1989b, 1992). Par exemple, aux stades précoces de la planification, la position de la cible va passer d'un cadre de référence rétino-topique vers un cadre de référence égocentrique centré sur l'œil, la tête ou l'épaule (McIntyre, Stratta, & Lacquaniti, 1997; Carozzo, McIntyre, Zago, & Lacquaniti, 1999). À un stade plus tardif, et en acceptant la notion de planification vectorielle du mouvement, les informations relatives à la cible seraient combinées à celle de l'effecteur au sein d'un cadre de référence centré sur la

main (Ghilardi, Gordon, & Ghez, 1995; Vindras & Viviani, 1998). De plus, ces transformations sensorimotrices peuvent s'avérer encore plus complexes selon la tâche effectuée et affecter la précision du mouvement. Bédard et Proteau (2005) ont montré, lors d'une étude comparative entre une tâche de pointage manuel et une tâche de pointage vidéo, que la précision/variabilité d'un mouvement pouvait être affectée par le degré de transformation visuomotrice à effectuer. Dans le cadre d'une tâche de pointage manuel où le mouvement est effectué dans le plan horizontal, les informations visuelles concernant la position initiale de l'effecteur, la cible et le mouvement sont représentées au sein de ce plan horizontal. Dans le cadre d'une tâche de pointage vidéo où le mouvement est effectué dans le plan horizontal, les informations visuelles concernant la position initiale de l'effecteur, la cible et le mouvement sont représentées au sein d'un plan vertical (l'écran vidéo). La comparaison des résultats de ces deux conditions visuomotrices montraient que dans le cadre d'une tâche de pointage vidéo, une fovéation successive de la base de départ et de la cible permettait d'assurer une meilleure précision; ceci comparativement à juste percevoir ces deux éléments spatiaux au sein du champ visuel. À l'inverse, cette différence de résultat due à la fovéation successive de la base de départ et de la cible n'apparaissait pas dans une condition expérimentale où de moindres transformations sensorimotrices étaient nécessaires (pointage manuel).

### Planification vectorielle du mouvement

Au niveau géométrique, tout déplacement cartésien peut-être assimilé à un vecteur caractérisé par des paramètres d'amplitude et de direction. Il semblerait que la genèse d'un mouvement chez l'humain pourrait reposer sur un principe identique de



planification vectorielle de mouvement. De nombreux résultats expérimentaux confortent cette hypothèse et montrent de plus une planification indépendante entre les composantes d'étendue et de direction. Ghez et ses collaborateurs ont proposé un modèle de planification vectorielle du mouvement où l'amplitude et la direction seraient définies séparément par le système nerveux central (Gordon, Ghilardi, & Ghez, 1994I; Gordon, Ghilardi, Cooper, & Ghez, 1994II; Gordon, Ghilardi, & Ghez, 1995; Ghez, Gordon, & Ghilardi, 1995). Ces auteurs ont mis en évidence ce mode de planification en utilisant une tâche d'atteinte manuelle avec des mouvements rapides non-corrigés.

Les participants devaient déplacer un manipulandum sur une table digitalisante sans voir le déplacement de leur bras afin d'éviter toute correction liée à la vision. La position initiale du mouvement ainsi que les cibles à atteindre étaient illustrées sur un écran disposé devant la table digitalisante. Les mouvements s'effectuaient dans une condition cible-seule i.e., que les afférences visuelles dynamiques inhérentes au mouvement n'étaient pas disponibles. Cette configuration expérimentale permettait d'attribuer les résultats aux mécanismes de planification et/ou aux mécanismes de modulation issus du traitement de la proprioception. Différentes configurations de cibles furent utilisées. Une première configuration correspondait à huit cibles placées tous les  $45^{\circ}$  sur des cercles de 3.2 cm ou 9.6 cm de rayon. Une seconde condition imposait des mouvements d'amplitude différente (2.4 cm, 4.8 cm, 9.6 cm, 19.6 cm ou 33.6 cm) vers des cibles placées sur des vecteurs orientés à 30 ou 150 degrés et partant respectivement des bords inférieurs gauche et droit de la table digitalisante. Ces auteurs analysèrent la distribution spatiale des erreurs de pointage en amplitude et en direction afin d'isoler dans quel système de coordonnées étaient planifiés les mouvements. En effet, selon la

forme et l'orientation de ces distributions, il est possible d'inférer le système de coordonnées dans lequel un mouvement est planifié. Un mouvement planifié dans un système de coordonnées polaires (i.e., dans l'espace des articulations) donnerait une dispersion équivalente (i.e., circulaire) pour les dimensions d'amplitude et de direction. À l'opposé, une planification vectorielle résulterait en une distribution de formes différentes pour les composantes d'étendue et de direction du mouvement (distribution elliptique).

Les résultats de Ghez et collaborateurs ont montré une plus grande variabilité des points terminaux en étendue qu'en direction. De plus, l'axe principal de cette distribution elliptique était orienté selon la direction moyenne du mouvement; ce qui conforte le concept de planification vectorielle. L'étude de la variabilité des points terminaux montra également que les erreurs variables en direction étaient plus stables alors que les erreurs en étendue augmentaient avec la longueur du mouvement. Cette dernière observation, associée au fait que les trajectoires sont orientées vers les cibles, suggère que l'aspect directionnel du vecteur de mouvement est un déterminant constant, programmé à l'avance et indépendant de la composante en étendue. Le fait que l'occurrence spatiale et l'étendue des pics d'accélération et de vitesse obtenues dans ces études variaient de façon proportionnelle à l'étendue du mouvement montre que l'amplitude du mouvement est une dimension paramétrable. Ghez et ses collaborateurs proposèrent que ce stade de planification centré sur la main était précoce et intégré à un cadre de référence extrinsèque distinct de l'étape tardive impliquant les aspects articulaires intégrés quant à eux dans un cadre de référence intrinsèque. L'ensemble des résultats de cette étude suggère une représentation vectorielle du mouvement centré sur

la main avec une spécification distincte de l'amplitude et de la direction. Cette notion de caractérisation indépendante des composantes d'étendue et de direction exprimée par des profils de variabilité spatiale elliptiques s'est d'ailleurs confirmée dans d'autres études. Dans une étude voulant évaluer le concept général de planification vectorielle énoncé par Ghez des profils similaires confortant l'idée d'une planification de type vectoriel ont été reproduit (Messier & Kalaska, 1997). Cependant, ces auteurs ont démontré que la forme des profils de variabilité (ellipses) suggérant une planification vectorielle étaient sensibles aux transformations sensorimotrices requises pour la planification du mouvement; ce qui démontre un aspect tâche-spécifique.

D'autres données expérimentales confortent le fait que la direction et l'étendue d'un mouvement sont codées distinctement et suggèrent une représentation vectorielle du mouvement. Vindras et Viviani (1998) ont mené une étude concernant une tâche de pointage qui était amorcée à partir de quatre bases de départ différentes vers une cible unique mémorisée. Dans cette étude, l'analyse de la précision terminale montrait une disposition des points terminaux en corrélation avec la position spatiale initiale de la base de départ. Les résultats de cette étude montraient également une distribution elliptique des erreurs variables orientée le long de l'axe principal du mouvement (dispersion minimale sur l'orientation du mouvement comparativement à une dispersion plus importante sur la composante d'étendue). Ce comportement différent concernant la dispersion en direction et en étendue du mouvement argumente en faveur de mécanismes de spécification indépendants concernant ces deux paramètres. Finalement, la notion de dépendance relative au point d'amorce du mouvement (base de départ) semble indiquer qu'il y aurait élaboration d'un vecteur reliant la base de départ à la cible

(Vindras & Viviani, 1998). Une dernière notion confortant le concept de planification vectorielle du mouvement concerne les référents visuels nécessaires à la production d'un mouvement. En effet, tel qu'il a été discuté au début de cette revue de la littérature, deux éléments visuels sont de prime importance dans la planification optimale d'un mouvement. Ces deux éléments sont la position initiale de l'effecteur ainsi que la position de la cible (Prablanc et al., 1979; Rossetti et al., 1994; Desmurget et al., 1995; Bédard & Proteau, 2001; Sarlegna et al., 2003). Ces deux points d'ancrage pourraient alors favoriser l'encodage du vecteur caractérisant le mouvement et suggèrent de manière indirecte l'élaboration d'un vecteur de mouvement.

#### Modèles et principes de contrôle du mouvement

Suite à son élaboration et à son amorce, un mouvement peut être effectué sans modification. Ceci peut aussi être le cas lors de mouvements très rapides ne donnant pas la possibilité de mettre en place des boucles de rétroaction. Hormis ces cas particuliers, la majorité des mouvements volontaires que nous produisons sont assujettis à un minimum de contrôle. Différents modèles de contrôle ont été proposés pour expliquer comment nous assurons la précision de nos mouvements.

Les principes fondamentaux du contrôle du mouvement chez l'humain nous viennent des travaux de Woodworth (1899) qui proposa une théorie qui a encore des échos aujourd'hui. Woodworth proposa qu'un mouvement s'articule en deux phases distinctes. La première phase serait caractérisée par une impulsion issue des mécanismes centraux de planification et celle-ci permettrait d'amener l'effecteur dans un périmètre proche de la cible à atteindre. Une seconde phase dite de "homing in" et nécessitant le

traitement des afférences sensorielles disponibles, servirait à amener l'effecteur en contact avec la cible. Cette seconde portion du mouvement aurait un rôle correctif. Comme nous le verrons un peu plus loin, il existe des corrections discrètes correspondant à des sous-mouvements correctifs qui sont à différencier des modulations en temps réel s'appliquant directement sur la commande initiale.

### Corrections de type discret

Schmidt dans son modèle conceptuel du contrôle du mouvement, proposa un mécanisme de contrôle articulé autour d'un mode de rétro-action en boucle fermée (1975, 1992). Selon cet auteur, l'élaboration du mouvement consisterait non seulement à planifier un vecteur de mouvement approprié mais aussi à anticiper les conséquences sensorielles associées à l'atteinte de l'objectif. Ainsi, en cours de mouvement l'individu serait en mesure de comparer les afférences associées au geste en cours d'exécution à celles qui avaient été anticipées. Les erreurs d'exécution seraient ainsi détectées et, le temps le permettant, pourraient être corrigées en cours d'exécution grâce à une impulsion de correction discrète. Ce modèle de contrôle reposant sur l'intégration des afférences sensorielles disponibles requiert par conséquent beaucoup de temps de traitement. Il n'est donc viable que dans le cadre de tâches allouant de longs temps de mouvement permettant le déroulement des boucles de rétroaction ou dans le cadre de mouvements continus.

Meyer, Abrams, Kornblum, Wright et Smith (1988) proposent également un modèle intégrant des corrections discrètes. Dans leur étude, les participants devaient effectuer des mouvements de vidéo-pointage. Chaque mouvement devait être exécuté le

plus vite et le plus précisément possible en maintenant un taux d'atteinte de cibles de 95%. La tâche imposée consistait à déplacer un curseur sur un écran vers une zone-cible délimitée par deux barres verticales. L'utilisation d'un manipulandum isolant les mouvements de rotation du poignet permettait le déplacement d'un curseur visible à l'écran. Les résultats obtenus montraient des mouvements composés d'une seule impulsion ou composés d'une impulsion principale associée à une correction discrète. À la lumière de ces résultats, Meyer proposa que pour ce type de tâche discrète l'impulsion initiale était planifiée pour optimiser le temps requis pour atteindre la cible. Cette optimisation serait calculée sur une grande série d'essais. Ainsi, le participant réaliserait son geste de sorte à produire un mouvement le plus rapidement possible et ceci sans que la proportion de corrections discrètes augmente de façon indue. Dans ce modèle, l'impulsion initiale ne peut pas être modulée sur la base des afférences disponibles. Si l'impulsion initiale ne permet pas d'atteindre la cible, une impulsion de correction est générée uniquement quand l'impulsion initiale est terminée.

Les deux modèles précédemment présentés énonçaient la possibilité d'un mode de contrôle utilisant des corrections discrètes. Cependant, le modèle proposé par Schmidt (1975, 1992) est difficilement viable pour des mouvements n'allouant pas assez de temps pour un rétro-contrôle sensoriel tandis que l'énoncé de Meyer et de ses collaborateurs (1988) concernant des mouvements rapides est très réducteur puisqu'il ne considère pas la possibilité d'une modulation en temps réel des impulsions de mouvement. Alternativement à ces deux modèles, il existe dans la littérature des données qui montrent la possibilité d'un contrôle du mouvement en temps réel.

### Corrections de type continu

Il a été récemment proposé un mode de contrôle hybride du mouvement. Ce modèle de contrôle hybride se caractériserait par une commande motrice modulée via un mécanisme d'anticipation utilisant l'intégration d'une copie de la commande motrice initiale et des afférences sensorielles issues du mouvement en cours d'exécution (pour une revue, voir Desmurget & Grafton, 2000). Desmurget et Grafton décrivent ce modèle hybride comme la combinaison d'une composante préprogrammée du mouvement qui serait ajustée en temps réel grâce à un système prédictif intégrant des informations sensorimotrices. Avant l'exécution du mouvement, une commande motrice grossière serait élaborée sur la base des informations spatiales pertinentes que sont la position de l'effecteur et la position de la cible. Cette commande motrice serait ensuite dirigée vers la moelle épinière pendant qu'une copie de cette commande (copie de l'efférence) serait générée au niveau cortical. L'intégration de cette copie de l'efférence et des afférences sensorielles inhérentes au mouvement permettrait de déterminer la position et la vitesse de l'effecteur et de prédire la position finale de celui-ci en fin de mouvement. L'estimé de la position finale de l'effecteur serait ensuite comparé à la position de la cible à atteindre. Un signal d'erreur est produit si le SNC considère que le mouvement en cours de réalisation ne permettra pas d'atteindre l'objectif initialement planifié (terminer sur la cible); une correction est alors appliquée au mouvement en cours d'exécution. De par son organisation, un tel mode de contrôle serait applicable tant aux mouvements qui doivent être exécutés très rapidement qu'à des mouvements plus

lents. D'ailleurs, un certain nombre de données expérimentales confortent la possibilité d'un tel mode de contrôle du mouvement en continu.

Un certain nombre d'études confortent ce modèle de contrôle du mouvement en continu. Un protocole évaluant les processus de contrôle mis en place lors d'une procédure de saut de cible suggère l'existence de mécanismes de contrôle permettant de corriger la trajectoire de la main en cours d'exécution. Le paradigme du saut de cible consiste à modifier la position spatiale d'une cible lorsqu'un participant effectue une saccade visuelle vers celle-ci. Le déplacement de la cible est fait au moment où la saccade visuelle atteint son pic de vitesse, i.e., lors de la suppression saccadique. La suppression visuelle présente lors de la saccade empêche toute perception consciente du changement de la position de la cible. Pélisson, Prablanc, Goodale et Jeannerod (1986) ont utilisé ce paradigme afin d'évaluer si les trajectoires de mouvement étaient corrigées en cours d'exécution lorsque la position spatiale de la cible à atteindre était déplacée à l'insu des participants. Leurs résultats ont montré que même si les participants n'avaient pas conscience des déplacements spatiaux de la cible, ils corrigeaient la trajectoire de leur mouvement vers la nouvelle position de cible. De plus, les profils cinématiques montraient des courbes d'accélération et de vitesse correspondant à des mouvements ne montrant aucune évidence de corrections discrètes ou de deuxième impulsion de mouvement. Ces résultats suggèrent la possibilité d'une correction en temps réel appliquée sur une impulsion unique de mouvement. Ils ont, de plus, été reproduits dans d'autres études avec des participants sains (Prablanc & Martin, 1992; Desmurget, Epstein, Turner, Prablanc, Alexander, & Grafton, 1999) mais aussi avec des participants ayant des troubles proprioceptifs.



Bard, Turell, Fleury, Teasdale, Lamarre et Martin (1999) ont évalué si les modulations de mouvement observées lors d'un paradigme de saut de cible résultaient du traitement d'information de type proprioceptif ou du traitement de la copie de l'efférence. Dans cette étude, un groupe contrôle et une patiente ayant une neuropathie sensorielle effectuaient une tâche de pointage manuel. Lors de certains essais, des sauts de cibles étaient appliqués afin d'évaluer si une correction de la trajectoire était mise en place. Les cibles à atteindre étaient situées sur un arc de 300 mm de rayon, soit à  $0^{\circ}$  (axe sagittal médian) soit dans l'hémichamp droit ( $12^{\circ}$ ,  $18^{\circ}$ ,  $24^{\circ}$ ). Le mouvement était réalisé en même temps qu'une saccade visuelle entre un point de fixation et la cible tandis que la vision de l'effecteur n'était pas permise. Pour un certain nombre d'essais, la position de la cible était modifiée au moment où le mouvement arrivait à son premier tiers, i.e., où la suppression visuelle inhérente à la saccade empêchait toute perception consciente du saut de cible. Pour ces essais perturbés, les auteurs observèrent une modulation en temps réel de la trajectoire de mouvement vers la nouvelle position de cible et ceci tant pour la patiente que pour le groupe contrôle. Il semblerait donc que les mécanismes de modulation impliqués n'auraient pas pour substrat principal les afférences proprioceptives du fait d'une modulation également observée pour la patiente. Les résultats de Bard et collaborateurs suggèrent plutôt une modulation basée sur la copie de l'efférence motrice et/ou oculomotrice (Desmurget & Grafton, 2000; Bédard & Proteau, 2005). Notons cependant que pour la patiente, la modulation des essais perturbés était moins précise que celle obtenue pour le groupe contrôle sain. Ceci suggère que pour être optimal, la composante prédictive du modèle hybride proposé par Desmurget et Grafton

aurait besoin de l'intégration par le SNC d'informations sensorielles pertinentes (indices visuels ou proprioceptifs relatifs à la position de l'effecteur).

Ce mode de contrôle du mouvement de type continu, tel qu'énoncé par les travaux de Desmurget, trouve également appui dans d'autres études comportementales utilisant un mode d'analyse plus spécifique.

Dans une tâche de vidéo-pointage, Proteau et Isabelle (2002) demandaient à des participants d'effectuer des mouvements sans avoir la possibilité d'effectuer des corrections discrètes. La tâche consistait à effectuer un pointage manuel vers des positions de cible multiples en condition de vision normale ou uniquement en voyant la position initiale du curseur et la cible (condition cible-seule). L'un des objectifs de cette étude était d'évaluer si une impulsion unique de mouvement était purement balistique ou pouvait être modulée en temps réel. Les quatre groupes expérimentaux étaient répartis selon la taille de la cible (5 mm ou 20 mm) et selon la condition visuelle (vision normale ou cible-seule). Le protocole comprenait une phase d'acquisition avec connaissance du résultat (CR) où chaque groupe pratiquait dans la condition visuelle qui lui avait été assignée; cette phase d'acquisition était suivie d'une phase de transfert en condition cible-seule sans CR. La tâche était temporellement contrainte pour assurer une fenêtre temporelle permettant le traitement des afférences sensorielles. Afin d'évaluer la possibilité d'une modulation en temps réel de l'impulsion unique de mouvement, les auteurs analysèrent la variabilité spatiale des profils cinématiques dans le plan cartésien (occurrence des pics d'accélération, de vitesse, de décélération et fin du mouvement). Si les biais initiaux en amplitude et en direction correspondent à une réponse purement issue de mécanismes de programmation et si l'on considère que ces processus

s'effectuent dans un contexte de bruit neuronal, il est possible de prédire ces profils de variabilité du mouvement progressant vers la cible. Par exemple, suite à l'amorce du mouvement (au niveau du pic d'accélération) un mouvement peut être biaisé dans une direction donnée. Dans le plan cartésien, ceci correspond à une déviation minime par rapport au vecteur de référence joignant la position initiale du mouvement à la cible. Pour un mouvement s'effectuant de manière balistique cette déviation devrait augmenter en fonction de la distance parcourue. Il découle de cette prédiction que pour une série de mouvements purement balistiques, la variabilité intra-sujet de l'occurrence des pics cinématiques en direction et en étendue devrait augmenter linéairement au cours du mouvement. Alternativement, une réduction de cette augmentation linéaire devrait refléter une modulation de l'impulsion initiale et suggérer, de fait, la présence de mécanismes de contrôle en temps réel. C'est exactement ce que montrèrent les résultats de Proteau et Isabelle (2002) pour les groupes vision normale.

Durant la phase d'acquisition, on observait pour ces deux groupes une augmentation de la variabilité du pic d'accélération au pic de décélération suivie d'une diminution significative entre le pic de décélération et la fin du mouvement; les groupes cible-seule montraient une augmentation de la variabilité du pic d'accélération à la fin du mouvement. Ces résultats suggèrent un mécanisme de modulation reposant sur le traitement des afférences visuelles dynamiques puisque absent dans les groupes contrôles (cible-seule). Ceci fut confirmé par les résultats de la phase de transfert des groupes vision normale où la modulation observée en acquisition était abolie. D'autres études ont reproduit ces résultats concernant l'existence d'une modulation en temps réel d'une impulsion unique de mouvement (Khan, Elliott, Coull, Chua, & Lyons, 2002;

Lhuisset & Proteau, 2002; Khan, Lawrence, Fourkas, Franks, Elliott, & Pembroke, 2003a; Sarlegna, Blouin, Bresciani, Bourdin, Vercher, & Gauthier, 2003; Sarlegna, Blouin, Vercher, Bresciani, Bourdin, & Gauthier, 2004; Bédard & Proteau, 2004). Récemment, cette méthode d'analyse de la variabilité des profils cinématiques a été affinée en utilisant une pondération de la variabilité par rapport à l'étendue du vecteur de mouvement à chaque pic cinématique. Il est alors calculé des coefficients de variabilité sur l'étendue ou la direction dont le profil type pour une modulation montre une variabilité élevée au pic d'accélération. Cette variabilité importante au pic d'accélération est ensuite suivie d'une réduction jusqu'en fin de mouvement, synonyme de la présence d'une modulation en temps réel (Proteau, 2005).

Le modèle proposé par Desmurget et Grafton (2000) et les travaux obtenus par Proteau et ses collaborateurs (2002; 2005) suggèrent la possibilité d'un contrôle continu du mouvement pouvant s'effectuer sur la commande motrice initiale contrairement à ce qu'avaient énoncé Meyer et al. (1988).

Tel que le montre les différents modèles de contrôle, nous pouvons en permanence adapter nos mouvements aux objectifs des actions dans lesquelles nous sommes engagés. Ces adaptations mènent à des modulations dont le but est de réduire la variabilité présente au sein du mouvement et de satisfaire aux exigences de la tâche. Cette nécessité d'adaptation du système visuo-moteur est encore plus requise en présence de distorsions influençant la bonne extraction des indices perceptuels relatifs à l'objet à atteindre ou à la position de l'effecteur engagé dans l'action.

### Adaptations perceptivo-motrices

Lors de tâches d'atteinte manuelle, le processus d'adaptation à une distorsion perceptive se produit en plusieurs étapes. Suite à l'induction de la distorsion, on observe en premier lieu une précision altérée suivie d'une phase de réduction des erreurs engendrées par cette distorsion; les erreurs initialement observées représentent l'effet perceptif direct. Au fur et à mesure de l'exposition à la distorsion et en présence d'information concernant la performance, on va observer une diminution significative des erreurs correspondant à la mise en place de l'adaptation perceptivo-motrice. Cette adaptation résulte de l'élaboration d'un modèle interne correspondant à l'apprentissage de nouvelles corrélations perceptivo-motrices spécifiques au contexte environnemental. On obtient alors une performance tendant à rejoindre les niveaux obtenus lors de la pré-exposition à la distorsion. Supprimer une distorsion suite à une procédure d'adaptation conduit généralement à la production d'erreurs dans le sens opposé à la perturbation initiale. Cet effet consécutif résulte de la persistance du modèle interne appris durant la phase d'adaptation (pour une revue, voir Redding, Rossetti, & Wallace, 2005). Un certain nombre d'études d'adaptation perceptivo-motrice montrent comment l'élaboration de ces modèles internes prend place.

### Adaptation à des distorsions visuelles et optiques

Dans une étude combinant tâche de pointage et adaptation prismatique, Norris et ses collaborateurs ont évalué les adaptations qui se mettaient en place lors de différentes représentations sensori-motrices du mouvement (Norris, Greger, Martin, & Thach, 2001). Les participants étaient assis devant une table digitalisante sur laquelle ils

devaient effectuer des mouvements au moyen d'une souris d'ordinateur. Au-dessus de la table était installé un écran vidéo qui, pour deux des trois conditions sensori-motrices utilisées, permettait d'illustrer les mouvements exécutés sur la table. La base de départ était positionnée sur le bord inférieur gauche de la table tandis que la cible à atteindre se trouvait dans la portion supérieure droite. Deux types de représentation de la base de départ, de la cible et des mouvements exécutés pouvaient être obtenues sur l'écran vidéo :

- une retransmission vidéo en temps réel du mouvement exécuté sur la table, ou de manière un peu plus virtuelle, par le biais d'une représentation graphique de la base de départ et de la cible (sous la forme de carré de 2.5 cm de côté) ainsi que de l'effecteur en mouvement (représenté par un curseur).

Pour ces deux représentations du mouvement, un cache empêchait la vision directe de la table et de la main. Une troisième condition sensori-motrice correspondait tout simplement à la vision directe du mouvement et des éléments relatifs à celui-ci (base de départ, cible et trajectoire) dans le plan horizontal de la table. Pour la recherche d'effets consécutifs à l'adaptation prismatique, le décours temporel de l'expérience comprenait quatre phases (pré-test/sans prisme; phase d'adaptation avec prisme; post-test/sans prisme (directement après l'adaptation); recouvrement/sans prisme). Cette procédure était répétée trois fois de suite dans un ordre randomisé et ceci pour chacune des trois conditions sensori-motrices.

Lors de la phase d'adaptation, les participants portaient des lunettes prismatiques qui avaient une valeur totale de 40 dioptries et déplaçaient la scène visuelle de  $23^{\circ}$  vers la gauche. La tâche consistait à produire des mouvements rapides et précis pour atteindre

la cible et ceci sans chercher à corriger le mouvement produit. Pour les premiers essais de la phase d'adaptation, les résultats montrèrent des mouvements déviés dans le sens de la perturbation prismatique et ceci dans les trois conditions perceptives utilisées. Cependant, on obtenait des biais plus importants pour la condition de vision directe (en moyenne 40 mm) comparativement à la condition vidéo (en moyenne 30 mm) et à la condition virtuelle (en moyenne 25 mm). Cette phase d'erreur de pointage était suivie d'une adaptation des mouvements dont la précision spatiale retrouvait les niveaux obtenus en pré-test et ceci pour les trois conditions. Lors du post-test, les premiers essais montrèrent une déviation dans le sens opposé à la perturbation initiale d'un ordre de grandeur identique aux biais observés en début de phase d'adaptation et ceci pour les trois conditions perceptives. Les résultats de cette adaptation prismatique ont montré la mise en place d'un nouveau modèle interne spécifique de la perturbation prismatique imposée. La présence de cette adaptation visuo-motrice a été confirmée par les effets consécutifs retrouvés en post-test et synonymes de la persistance de l'adaptation mise en place lors de l'exposition à la distorsion prismatique. Les différents degrés d'expression de la déviation prismatique obtenus pour les différentes conditions perceptives utilisées suggèrent que les transformations sensori-motrices peuvent influencer l'effet direct de la perturbation; et a fortiori l'adaptation à mettre en place.

Ce type de résultat concernant les mécanismes d'adaptation se produisant lors de l'exposition à des déviations prismatiques dans le cadre de tâche de pointage a été reproduit dans de nombreuses études (Redding & Wallace, 2000; pour une revue Redding, Rossetti, & Wallace, 2005).

L'utilisation de distorsion de type prismatique est un moyen d'induire des biais perceptifs et d'étudier les mécanismes adaptatifs que le système visuo-moteur peut mettre en place lorsque les informations visuelles relatives au mouvement sont altérées. Des auteurs ont aussi étudié les adaptations qui se mettaient en place pour des distorsions touchant les informations visuelles dynamiques inhérentes au mouvement (par distorsion du facteur d'échelle ou par rotation du cadre de référence).

Krakauer, Pine, Ghilardi et Ghez (2000) ont effectué une expérience où ils étudiaient l'adaptation mise en place lors de distorsions visuelles de la composante étendue ou de l'aspect directionnel du mouvement. Le protocole consistait à effectuer des mouvements d'aller-retour, sur une table digitalisante, vers une cible unique ou vers des positions de cibles multiples. Les mouvements produits ainsi que les cibles étaient présentés sur un écran vertical positionné au dessus de la table devant laquelle les participants prenaient place. Des distorsions distinctes pouvaient être induites selon les groupes. Dans un premier cas de figure, un changement de gain était appliqué au mouvement; i.e., une différence de ratio entre l'illustration du mouvement à l'écran et le mouvement réellement produit sur la table digitalisante (ratio de 1.5/1). Cette distorsion demandait l'apprentissage d'une nouvelle mise à l'échelle de l'étendue du mouvement. Dans un second cas de figure, une rotation du cadre de référence du mouvement à l'écran était appliquée (le mouvement illustré par le curseur à l'écran subissait une rotation de  $30^{\circ}$  dans le sens anti-horaire). Cette distorsion demandait un apprentissage basé sur la réorientation du vecteur de mouvement. Chaque groupe était impliqué dans un protocole expérimental composé d'une phase de familiarisation où aucune



perturbation n'était appliquée suivie d'une phase d'adaptation où perturbations visuelles étaient appliquées.

À la fin de la phase de familiarisation du protocole de changement de gain, les participants produisaient des mouvements aller-retour droit dont la phase aller se terminait au centre de la cible à atteindre. Par contre, les premiers mouvements de la phase d'adaptation étaient toujours hypermétriques. Les courbes d'apprentissage obtenues pour la phase d'adaptation montraient cependant qu'au fur et à mesure des essais, l'étendue des mouvements diminuait avec en parallèle une diminution de la valeur des pics de vitesse. Ceci montre que certains paramètres des mouvements étaient adaptés à la contrainte visuo-motrice imposée par le changement de gain. Ces résultats indiquent que les participants procédaient à un ajustement (nouveau modèle interne) de la relation liant l'étendue du mouvement et le pic de vitesse à la distance de cible. Les résultats concernant l'adaptation à une rotation du cadre de référence du mouvement montrent également la mise en place d'un modèle interne correspondant à une réorientation du vecteur de mouvement. En effet, les courbes d'apprentissage exprimant l'erreur directionnelle au pic de vitesse montre une diminution significative de cette erreur entre le début et la fin de la phase de pratique. Cependant, l'adaptation était plus complète vers une direction de cible unique comparativement aux résultats des participants confrontés à des positions multiples de cible.

La mise en place d'une adaptation perceptivo-motrice n'est cependant pas exclusive à la modalité visuelle. En effet, il a également été démontré la mise en place d'adaptations perceptivo-motrices lors de protocoles de perturbation de la dynamique d'un mouvement.

### Adaptation à une distorsion inertielle

Dans une étude sur l'adaptation de la dynamique d'un mouvement à une distorsion inertielle, Krakauer, Ghilardi et Ghez (1999) demandaient à des participants d'effectuer des mouvements d'aller-retour vers des cibles visuelles afin d'analyser l'apprentissage mis en place. Les participants devaient effectuer ces mouvements sur une table digitalisante et leurs mouvements ainsi que les cibles à atteindre étaient représentés sur un écran vertical. Les mouvements de l'épaule et du poignet étaient restreints, ce qui ne permettait d'exécuter la tâche de pointage qu'avec l'articulation du coude. Les huit cibles à atteindre étaient disposées sur un cercle de 4.2 cm de rayon, la base de départ étant au centre de ce cercle. Un cache opaque empêchait les participants de voir leur bras durant tout le protocole. Dans une des conditions principales, une masse de 1500 grammes était fixée latéralement à l'avant-bras afin de changer le centre de masse de celui-ci. L'objectif de cette procédure était de perturber la dynamique inter-segmentaire au niveau l'articulation du coude.

Les trajectoires obtenues lors du premier cycle de la phase d'entraînement montrèrent clairement des erreurs directionnelles à l'amorce du mouvement ainsi que des trajectoires très courbes. La courbure des trajectoires fut analysée en utilisant l'aire normalisée de la trajectoire ( $[\text{surface couverte par la trajectoire aller-retour}]/[\text{longueur du mouvement}]^2$ ). Les résultats relatifs à l'aire normalisée montrèrent des surfaces importantes en début d'apprentissage comparativement aux surfaces significativement réduites obtenues lors du dernier cycle de pratique. Ceci signifie qu'en début d'apprentissage, les déviations dues à la masse étaient importantes et furent réduites au

fur et à mesure de la pratique. Ceci se confirmait d'ailleurs par des trajectoires plus rectilignes en fin de pratique. Ces résultats suggèrent donc la mise en place de nouvelles corrélations perceptivo-motrices spécifiques à la dynamique inter-segmentaire résultant de l'ajout de la masse. Ce type d'apprentissage a également été reproduit dans une tâche d'atteinte manuelle perturbée par des champs de force perpendiculaires au mouvement (Karniel & Mussa-Ivaldi, 2002; condition avec 1 seul champ de force). Les processus d'adaptation révélés dans ces études ne sont cependant pas exclusifs à la modalité proprioceptive.

## Contexte de la thèse

Les différentes distorsions retrouvées dans les études d'adaptation sont générées à des fins expérimentales. Il existe cependant des distorsions auxquelles nous pouvons être confrontés dans la vie de tous les jours. Un meilleur exemple est l'adaptation nécessaire lorsque l'on utilise une souris d'ordinateur. En effet, le ratio de déplacement ainsi que la vitesse de la représentation de la souris à l'écran (i.e., le curseur) varient souvent d'un ordinateur à un autre. Ce type de distorsion peut être assimilé à un changement de gain lorsque l'on passe d'un ordinateur à un autre. Cependant, les adaptations à ces contraintes perceptivo-motrices différentes se font rapidement et souvent sans que nous en ayons conscience.

Notons cependant que l'ensemble des études d'adaptation ayant perturbées la modalité visuelle, imposaient des distorsions homogènes en tous points de l'espace. Par exemple, la distorsion visuelle induite par un prisme va déplacer de la même manière la position initiale de l'effecteur et celle de la cible à atteindre. Ceci peut expliquer la grande facilité du système visuo-moteur à s'adapter à ce genre de perturbations. Il est cependant important d'évaluer la fiabilité d'un modèle interne mis en place dans un environnement où les distorsions ne sont pas identiques selon le point de l'espace considéré. Ce type d'environnement perceptif peut-être généré par des verres à foyers progressifs dont la puissance optique varie du centre de la lentille vers le bas. La structure physique de ces verres correcteurs, portés par la majorité des individus presbytes, induit des distorsions optiques qui déforment l'espace de manière non uniforme. Ce type de verre va induire des distorsions qui vont être croissantes du centre

optique (centre du verre) vers le bas de la lentille et aussi vers la portion temporale de celle-ci. Ces distorsions optiques vont créer des effets optiques qui vont déformer l'espace et qui auront tendance à déplacer les positions spatiales d'objets surtout dans la portion inféro-temporale de la lentille. La portion inféro-temporale de ce type de verre est la zone la plus problématique car elle comprend à la fois les plus grandes distorsions et les plus grandes aberrations optiques relativement aux autres zones du verre. Les aberrations optiques résultent de l'addition contenue dans la portion inférieure du verre et se manifestent par une vision plus floue dans cette zone. Pour passer outre cet artefact optique, un couloir de progression est mis en place lors de la fabrication du verre afin de permettre une zone de vision nette au sein de la zone de progression de l'addition optique. À notre connaissance, personne n'a évalué si ce type de biais induit au sein de l'environnement a un impact sur les processus de contrôle du mouvement. Dans ce contexte perceptif variable générant des biais, observe-t-on une modulation en temps réel plus marquée ? Alternativement, y aurait-il une plus grande production de corrections discrètes ?

Pour évaluer ces mécanismes nous avons décidé d'utiliser un modèle expérimental basé sur l'utilisation de verres à foyer progressif. En effet, le verre progressif du fait de sa structure est générateur d'un environnement perceptif variable d'un point de l'espace donné à un autre. De plus, il a été noté en clinique des plaintes liées à des problèmes d'adaptation et de tolérance à ce type de verres (imprécisions motrices; mouvements inadaptés dus à une mauvaise évaluation de la distance, chute dans escaliers). Nous allons donc évaluer dans le cadre d'une tâche d'atteinte manuelle l'adaptation au type de

distorsions non-linéaires générées par les verres à foyer progressif chez de nouveaux porteurs jeunes et âgés.

De plus, l'utilisation d'un modèle expérimental basé sur le verre progressif a un autre intérêt. En effet, dans l'ensemble des études d'adaptation perceptive les perturbations utilisées sont grandes (de l'ordre de 30 dioptries dans les adaptations prismatiques par exemple). L'amplitude de ces perturbations implique donc que le conflit entre la vision et la proprioception est évident. Il est donc important d'évaluer lors de perturbations plus subtiles si les mécanismes adaptatifs rencontrés dans d'autres études demeurent efficaces. Dans la mesure où une distorsion est très subtile, est-ce que le conflit vision-proprioception est assez évident pour l'établissement d'un nouveau modèle interne ? Si cela est le cas, le modèle interne mis en place est-il fiable du fait de la variabilité des distorsions générées par le verre progressif ?

Au préalable, nous allons étudier les mécanismes de contrôle impliqués dans une tâche spatialement contrainte. En effet, le modèle hybride de Desmurget et Grafton (2000) concernant la possibilité d'un contrôle en continu a été confirmé lors d'une étude comportementale pour une tâche temporellement contrainte (Proteau & Isabelle, 2002). Cependant en présence de distorsions optiques ce sont les indices spatiaux qui sont principalement affectés (position de départ ou position de la cible). Il est donc important de comprendre comment un mouvement est contrôlé lorsque l'on demande à un participant d'être précis et de terminer sur une cible (i.e., dans une tâche contrainte de manière spatiale). Dans un second temps, nous évaluerons l'impact de distorsions non-linéaires induites par les verres progressifs sur ces mécanismes de contrôle et ceci dans un protocole d'adaptation visuo-motrice.

## Bibliographie

- Bard, C., Turrell, Y., Fleury, M., Teasdale, N., Lamarre, Y., & Martin, O. (1999). Deafferentation and pointing with visual double-step perturbations. *Exp Brain Res, 125*(4), 410-416.
- Bedard, P., & Proteau, L. (2001). On the role of static and dynamic visual afferent information in goal-directed aiming movements. *Exp Brain Res, 138*(4), 419-431.
- Bedard, 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*(1), 75-85.
- Bedard, P., & Proteau, L. (2005). Movement planning of video and of manual aiming movements. *Spat Vis, 18*(3), 275-296.
- Biguer, B., Donaldson, I. M., Hein, A., & Jeannerod, M. (1988). Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain, 111* (Pt 6), 1405-1424.
- Bock, O. (1986). Contribution of retinal versus extraretinal signals towards visual localization in goal-directed movements. *Exp Brain Res, 64*(3), 476-482.
- Carrozzo, M., McIntyre, J., Zago, M., & Lacquaniti, F. (1999). Viewer-centered and body-centered frames of reference in direct visuomotor transformations. *Exp Brain Res, 129*(2), 201-210.

- Desmurget, M., Epstein, C. M., Turner, R. S., Prablanc, C., Alexander, G. E., & Grafton, S. T. (1999). Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target. *Nat Neurosci*, *2*(6), 563-567.
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends Cogn Sci*, *4*(11), 423-431.
- Desmurget, M., Rossetti, Y., Jordan, M., Meckler, C., & Prablanc, C. (1997). Viewing the hand prior to movement improves accuracy of pointing performed toward the unseen contralateral hand. *Exp Brain Res*, *115*(1), 180-186.
- Desmurget, M., Rossetti, Y., Prablanc, C., Stelmach, G. E., & Jeannerod, M. (1995). Representation of hand position prior to movement and motor variability. *Can J Physiol Pharmacol*, *73*(2), 262-272.
- Ghez, C., Gordon, J., & Ghilardi, M. F. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. Effects of visual information on accuracy. *J Neurophysiol*, *73*(1), 361-372.
- Ghilardi, M. F., Gordon, J., & Ghez, C. (1995). Learning a visuomotor transformation in a local area of work space produces directional biases in other areas. *J Neurophysiol*, *73*(6), 2535-2539.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., Cooper, S. E., & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements. II. Systematic extent errors resulting from inertial anisotropy. *Exp Brain Res*, *99*(1), 112-130.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements. I. Independence of direction and extent variability. *Exp Brain Res*, *99*(1), 97-111.



- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. I. Spatial errors. *J Neurophysiol*, *73*(1), 347-360.
- Han, Y., & Lennerstrand, G. (1999). Changes of visual localization induced by eye and neck muscle vibration in normal and strabismic subjects. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, *237*(10), 815-823.
- Kalaska, J. F., & Crammond, D. J. (1995). Deciding not to GO: neuronal correlates of response selection in a GO/NOGO task in primate premotor and parietal cortex. *Cereb Cortex*, *5*(5), 410-428.
- Karniel, A., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2002). Does the motor control system use multiple models and context switching to cope with a variable environment? *Exp Brain Res*, *143*(4), 520-524.
- Khan, M. A., Elliot, D., Coull, J., Chua, R., & Lyons, J. (2002). Optimal control strategies under different feedback schedules: kinematic evidence. *J Mot Behav*, *34*(1), 45-57.
- Khan, M. A., Lawrence, G., Fourkas, A., Franks, I. M., Elliott, D., & Pembroke, S. (2003). Online versus offline processing of visual feedback in the control of movement amplitude. *Acta Psychol (Amst)*, *113*(1), 83-97.
- Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nat Neurosci*, *2*(11), 1026-1031.
- Krakauer, J. W., Pine, Z. M., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (2000). Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *J Neurosci*, *20*(23), 8916-8924.

- Larish, D. D., Volp, C. M., & Wallace, S. A. (1984). An empirical note on attaining a spatial target after distorting the initial conditions of movement via muscle vibration. *J Mot Behav*, *16*(1), 76-83.
- Lhuisse, L., & Proteau, L. (2002). Developmental aspects of the control of manual aiming movements in aligned and non-aligned visual displays. *Exp Brain Res*, *146*(3), 293-306.
- McIntyre, J., Stratta, F., & Lacquaniti, F. (1997). Viewer-centered frame of reference for pointing to memorized targets in three-dimensional space. *J Neurophysiol*, *78*(3), 1601-1618.
- Messier, J., & Kalaska, J. F. (1997). Differential effect of task conditions on errors of direction and extent of reaching movements. *Exp Brain Res*, *115*(3), 469-478.
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Smith, J. E. (1988). Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements. *Psychol Rev*, *95*(3), 340-370.
- Norris, S. A., Greger, B. E., Martin, T. A., & Thach, W. T. (2001). Prism adaptation of reaching is dependent on the type of visual feedback of hand and target position. *Brain Res*, *905*(1-2), 207-219.
- Pelisson, D., Prablanc, C., Goodale, M. A., & Jeannerod, M. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. II. Evidence of fast unconscious processes correcting the trajectory of the hand to the final position of a double-step stimulus. *Exp Brain Res*, *62*(2), 303-311.

- Prablanc, C., Echallier, J. E., Jeannerod, M., & Komilis, E. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. II. Static and dynamic visual cues in the control of hand movement. *Biol Cybern*, 35(3), 183-187.
- Prablanc, C., Pelisson, D., & Goodale, M. A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand. *Exp Brain Res*, 62(2), 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(4), 441-456.
- 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(4), 367-384.
- Redding, G. M., Rossetti, Y., & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method. *Neurosci Biobehav Rev*, 29(3), 431-444.
- Redding, G. M., & Wallace, B. (2000). Prism exposure aftereffects and direct effects for different movement and feedback times. *J Mot Behav*, 32(1), 83-99.
- Rossetti, Y., Desmurget, M., & Prablanc, C. (1995). Vectorial coding of movement: vision, proprioception, or both? *J Neurophysiol*, 74(1), 457-463.
- 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(2), 323-330.

- Rossetti, Y., Tadary, B., & Prablanc, C. (1994). Optimal contributions of head and eye positions to spatial accuracy in man tested by visually directed pointing. *Exp Brain Res*, 97(3), 487-496.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Bresciani, J. P., Bourdin, C., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (2003). Target and hand position information in the online control of goal-directed arm movements. *Exp Brain Res*, 151(4), 524-535.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Vercher, J. L., Bresciani, J. P., Bourdin, C., & Gauthier, G. M. (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. *Exp Brain Res*, 157(4), 468-471.
- Schmidt, R.A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychol Rev*, 82(4), 225-260.
- Schmidt & Lee (1992). Motor Control and Learning, a behavioural emphasis (third edition). *Human Kinetics*.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989a). Errors in pointing are due to approximations in sensorimotor transformations. *J Neurophysiol*, 62(2), 595-608.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989b). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *J Neurophysiol*, 62(2), 582-594.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1992). Moving in three-dimensional space: frames of reference, vectors, and coordinate systems. *Annu Rev Neurosci*, 15, 167-191.
- Vindras, P., Desmurget, M., Prablanc, C., & Viviani, P. (1998). Pointing errors reflect biases in the perception of the initial hand position. *J Neurophysiol*, 79(6), 3290-3294.

Vindras, P., & Viviani, P. (1998). Frames of reference and control parameters in visuomanual pointing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 24(2), 569-591.

Woodworth, R.S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychol Rev*, 3 (Monograph Supplement) : 1-119.

**Chapitre 2**  
**Méthodologie**

## Méthodologie générale

Dans cette section, il sera présenté la tâche et la configuration expérimentale utilisées pour les études qui vont suivre. Toute modification de la tâche ou de la configuration expérimentale présentées dans la présente section sera le cas échéant décrite.

### La tâche

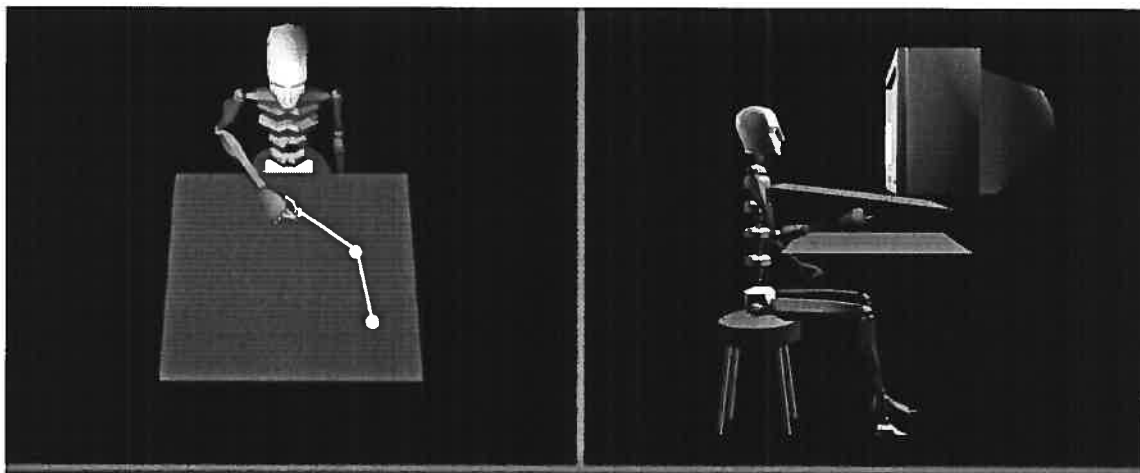
Les expériences présentées dans cette thèse s'articuleront autour de tâches de pointage vidéo. Par le biais d'un bras articulé en deux dimensions (ou manipulandum) disposé sur une table, les participants devaient effectuer des mouvements de pointage vers une cible. Les différentes positions de cible à atteindre ainsi que les trajectoires des mouvements exécutés étaient représentées sur un écran vidéo. Une seule cible était présentée lors des essais.

### Configuration expérimentale et appareillage

Le montage expérimental était composé d'un écran d'ordinateur, d'une table, d'une mentonnière, d'un manipulandum et d'un ordinateur. Les participants étaient assis devant la table au-dessus de laquelle se trouvait un écran d'ordinateur (Mitsubishi, Color Pro Diamond, 92.5 cm) positionné verticalement. L'écran était supporté par une structure métallique fixée au plafond, structure permettant de faire pivoter l'écran de la position verticale vers une position horizontale selon les besoins expérimentaux. La distance entre le bord inférieur de l'écran et la table était de 12 cm, ce qui permettait le

déplacement du manipulandum en dessous de l'écran lorsque la position des cibles l'exigeait (figure 1).

Figure 1. Le montage expérimental.



La table placée en dessous de l'écran était recouverte d'une fine plaque de Plexiglas<sup>®</sup>. Une base de départ, constituée d'une pièce de Plexiglas<sup>®</sup> en forme de L, était fixée au centre du rebord proximal de la table et ceci dans l'alignement direct du centre de l'écran. Cette position de la base de départ avait pour objectif de faciliter le remplacement du manipulandum entre chaque essai.

Le manipulandum utilisé était fait de deux pièces de Plexiglas, de 43 cm de long, fixées l'une à l'autre pour former une jonction articulée ou coude (figure 1). L'extrémité distale du manipulandum était fixée à un axe de rotation équipé d'un potentiomètre (US Digital, Vancouver, WA, Model S2-2048) échantillonné à 500 Hz. Du point de vue du participant, l'extrémité distale du manipulandum était à 40 cm à gauche de la base de départ et à 70 cm du rebord inférieur de la table. La jonction articulée du manipulandum était aussi équipée d'un potentiomètre. Finalement, l'extrémité libre du manipulandum se terminait par un stylet de 3 cm de haut et de 1 cm de diamètre; ceci permettait aux



participants d'avoir une prise confortable. Les deux parties du manipulandum équipées de potentiomètre nous permettaient d'illustrer les déplacements en temps réel du stylet à l'écran via le déplacement d'un curseur. Le ratio entre les déplacements du stylet sur la table et les déplacements du curseur à l'écran était de 1:1; le curseur était noir et avait 4 mm de côté. Un lubrifiant à base de silicone était appliqué sur la table avant chaque session expérimentale; la friction du manipulandum sur la surface de Plexiglas® était négligeable.

Les cibles étaient présentées à différentes positions sur l'écran. Un cache opaque était installé au-dessus de la table afin d'empêcher les participants de voir les mouvements produits. De plus, pour que la localisation des cibles se fasse de la même manière pour chaque participant, une mentonnière était fixée à la table dans l'alignement du centre de l'écran. Les participants devaient y appuyer leur menton et maintenir la tête droite durant l'expérience. Finalement, l'acquisition des données était obtenue grâce à un ordinateur qui générait les conditions expérimentales et enregistrait les données.

### Procédure

À l'écran, les participants devaient positionner le curseur représentant le stylet sur la représentation de la base de départ. À l'apparition d'une cible, les participants devaient effectuer un mouvement vers celle-ci. Les participants pouvaient amorcer les mouvements à leur guise suite à la présentation d'une cible (la tâche n'était pas une tâche de temps de réaction), mais devaient effectuer ces mouvements le plus rapidement tout en s'assurant de terminer le mouvement sur la cible. Les mouvements étaient considérés comme complétés lorsque le curseur était immobilisé sur la cible pendant 1

seconde ou stable durant 2 secondes en dehors de cette localisation spatiale. Dans la situation où les mouvements se terminaient en dehors de la cible pour les groupes bénéficiant de la vision de leur mouvement (voir plus loin), l'expérimentateur rappelait que la tâche impliquait de finir sur la cible. Il était également rappelé aux participants qu'ils avaient la possibilité, dans cette situation, de corriger leur mouvement. Ce cas de figure s'est produit en proportion minime pour l'ensemble de ces participants (moins de 10 % des essais).

### Acquisition des données

L'amorce du mouvement était détectée lorsque le curseur atteignait la vitesse tangentielle de 10 mm/s. Le mouvement était considéré comme terminé lorsque le curseur s'arrêtait sur la cible pour 1 seconde, ou en dehors de celle-ci durant 2 secondes. L'erreur en direction était l'écart (en mm) séparant le vecteur de référence (vecteur joignant la base de départ au centre de la cible) du vecteur joignant la base de départ au centre du curseur à la fin du mouvement. Une valeur positive indique que le mouvement s'est arrêté à droite de la cible tandis qu'une valeur négative indique que le mouvement s'est terminé à gauche de la cible. L'erreur en étendue d'un essai était définie par la différence entre la longueur du vecteur de référence et celle du vecteur à la fin du mouvement. Une valeur positive indique que le mouvement a surestimé la cible tandis qu'une valeur négative indique que le mouvement a sous-estimé la cible. À partir de ces données, nous avons calculé les erreurs constante et variable sur l'étendue et l'orientation du mouvement. L'erreur constante était relative au biais produit par les participants lors de leur mouvement (par exemple trop long ou trop à droite) tandis que

l'erreur variable représentait la mesure de variabilité intra-sujet (dispersion des mouvements autour de la position finale moyenne).

Différentes variables relatives au déroulement du mouvement ont également été analysées. À cet effet, les données de déplacement du manipulandum sur la direction et l'étendue ont été lissées par un filtre récursif de second ordre de type Butterworth à une fréquence de coupure de 10 Hz. Les données filtrées ont été dérivées afin d'obtenir les profils de vitesse, d'accélération ainsi que le jerk. La fin de la première impulsion de mouvement était définie selon différents critères:

- a) renversement du mouvement (profil de vitesse passant du positif au négatif).
- b) allongement du mouvement caractérisé par une seconde impulsion de mouvement (deuxième accélération).
- c) modification significative de la phase de décélération de l'impulsion initiale caractérisée par un croisement de l'abscisse sur le profil du jerk.

Une seconde impulsion correctrice était considérée comme une correction discrète lorsque sa durée était au minimum de 80 ms pour une étendue d'au moins 2 mm.

### Description des figures et tableaux

L'ensemble des tableaux et des figures des différents chapitres de cette thèse sont décrit dans les sections de liste de tableaux et figures suivant la table des matières.

### Chapitre 3

Contrôle du mouvement pour une tâche contrainte de manière spatiale.

## Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons étudier les mécanismes de contrôle mis en jeu dans le cadre d'une tâche de pointage contrainte de manière spatiale. Depuis les travaux pionniers de Woodworth (1899), il est largement accepté qu'un mouvement d'atteinte manuelle est composé d'une impulsion initiale visant à amener l'effecteur dans un périmètre proche de la cible à atteindre ou sur la cible. Si ce mouvement initial venait à manquer la cible, un sous-mouvement correctif est alors produit pour permettre l'atteinte de la cible. Le besoin de produire une correction du mouvement résulte de plusieurs facteurs, telles les erreurs de planification ou d'exécution ainsi que de la variabilité produite par le bruit neuronal au sein des mécanismes de planification et d'exécution. Suite à un entraînement prolongé vers un petit nombre de cibles, les erreurs de planification et d'exécution pourront être considérablement réduites. Toutefois, à cause du bruit neuronal, il demeurera un certain degré de variabilité au sein des mécanismes de planification et d'exécution; d'où le recours à de potentielles corrections. De plus, la probabilité de produire ces corrections est fonction de la longueur et de la vitesse du mouvement produit ainsi que de l'indice de difficulté de la tâche (Fitts, 1954; Meyer et al., 1988).

Meyer et ses collaborateurs (1988) ont montré l'existence d'une stratégie de contrôle du mouvement à impulsion unique ou avec correction discrète. Dans cette expérience, les participants devaient effectuer une tâche de pointage le plus rapidement et le plus précisément possible. Les résultats ont révélé que les participants optimisaient la vitesse de leur mouvement pour terminer sur la cible en une seule impulsion pour une

grande proportion des essais tout en acceptant de devoir produire une correction discrète pour certains de ceux-ci, et ce, afin de pouvoir produire des mouvements rapides. À l'issue de cette expérience, les auteurs proposèrent un modèle selon lequel l'impulsion de correction était élaborée sur la base des informations extraites lors de l'exécution de l'impulsion initiale. Cependant, ce modèle stipulait que cette correction discrète ne pouvait s'effectuer qu'après finalisation de l'impulsion initiale et non pas par modulation en temps-réel de cette dernière. Ce dernier aspect du modèle de Meyer peut cependant être remis en question par deux séries de données expérimentales.

En premier lieu, Prablanc et Martin (1992) lors de l'étude d'une tâche d'atteinte manuelle avec ou sans sauts de cible ont montré qu'une impulsion unique de mouvement pouvait être modulée en cours d'exécution. Les participants de cette étude devaient fover focaliser un point de fixation de part et d'autre duquel pouvait apparaître une cible. Lors de l'apparition de la cible, ils devaient l'atteindre avec l'index de leur main dominante. Pour certains essais (essais perturbés), la cible subissait une translation de 2 cm à droite ou à gauche de sa position initiale et ceci au moment où la saccade visuelle des participants atteignait son pic de vitesse. Ainsi, la suppression saccadique empêchait toute perception consciente du déplacement spatial de la cible. Les résultats obtenus montrèrent que même si les participants ne percevaient pas le saut de cible, ils corrigeaient la trajectoire de leur mouvement pour atteindre sa nouvelle position. De plus, les profils cinématiques montraient que les mouvements effectués étaient composés d'une seule impulsion de mouvement et ceci tant pour les essais perturbés que pour les essais contrôles. Ce type de résultat a été reproduit dans des protocoles où les afférences

visuelles dynamiques étaient disponibles ou ne l'étaient pas (Goodale, Pélisson et Prablanc, 1986; Prablanc & Martin, 1992). Ces données montrent clairement la possibilité de moduler en temps réel la première impulsion de mouvement et ceci en présence ou en l'absence d'afférences visuelles dynamiques. De plus, la présence d'une telle modulation en l'absence des afférences visuelles dynamiques suggère un mécanisme reposant sur l'utilisation de la copie de l'efférence du mouvement qui serait comparée aux signaux rétiniens et extra-rétiniens relatifs à la position de la cible et aux informations proprioceptives issues de l'effecteur (Desmurget et Grafton, 2000).

Si l'on considère à la fois que tout mouvement oculaire vers une cible nécessite une saccade de correction et que la planification d'un mouvement d'atteinte manuelle s'achève souvent lorsque la cible est en vision fovéale, alors les processus de modulation en temps réel observés lors des expériences de saut de cibles s'inscrivent dans un processus normal d'adaptation. Ceci expliquerait alors les résultats similaires observés en présence des sauts de cible ou lors des essais contrôlés. À ce stade et en dehors de l'énoncé des impulsions de mouvement purement balistiques, le modèle de Meyer et de ses collaborateurs (1988) reste viable.

En second lieu, un principe d'analyse de la variabilité du mouvement et un certain nombre de données expérimentales contredisent l'aspect réducteur du modèle de Meyer concernant la structure purement balistique des impulsions de mouvement. En effet, si un mouvement résulte uniquement de mécanismes de planification et si l'on accepte la notion que ces mécanismes de planification prennent place au sein d'un contexte de bruit neuronal (Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Franks, & Quinn, 1979; Meyer et al., 1982, 1988), il est alors possible de prédire des profils de variabilité spatiale du

mouvement produit. Par exemple, il est possible que tôt dans l'exécution (i.e., au niveau du pic d'accélération) du mouvement, celui-ci soit dévié dans une direction donnée. Pris dans l'espace cartésien cette déviation par rapport au vecteur de référence (vecteur joignant la base de départ à la cible) devrait être minimale. Si ce mouvement s'avérait être purement balistique, cela induirait que l'écart entre le mouvement réalisé et le vecteur de référence à chaque marqueur cinématique devrait alors croître linéairement au cours du déplacement de l'effecteur vers la cible (de l'accélération à la fin du mouvement), et ceci tant en direction qu'en amplitude. Ceci mène à la prédiction que si une série de mouvements ne dépend que d'un processus de planification, la variabilité de cette série de mouvements devrait augmenter linéairement au fur et à mesure de son déroulement. À l'inverse, la présence d'une stabilisation ou réduction de cette variabilité devrait alors refléter la mise en place d'un mécanisme de modulation en temps réel de l'impulsion de mouvement alors qu'une réduction de cette variabilité associée à une seconde impulsion correspondrait à une correction discrète du mouvement.

Dans une série d'études, Proteau et ses collaborateurs (Lhuisset et Proteau, 2002; Proteau et Isabelle, 2004; Bédard et Proteau, 2004; Proteau, 2005) ont montré l'existence de mécanismes de modulation en temps réel de l'impulsion initiale de mouvement lors d'une tâche d'atteinte manuelle. Ces études ont montré tant pour la composante directionnelle que pour l'étendue du mouvement que la variabilité augmentait du pic d'accélération au pic de décélération. Dès lors, et uniquement lorsque l'information visuelle dynamique était disponible, on observait une diminution significative de la variabilité jusqu'en fin de cette impulsion initiale de mouvement. Cependant, cette diminution était atténuée en l'absence des informations visuelles



dynamiques (seulement la base de départ et la cible étaient visibles). La même conclusion était supportée lorsque la variabilité spatiale à chaque marqueur cinématique était normalisée par rapport à la longueur du vecteur de mouvement (coefficient de variabilité). Dans les protocoles de Proteau et de ses collaborateurs, aucune réduction de ce coefficient de variabilité ne fut observée entre le pic de vélocité et la fin de l'impulsion initiale de mouvement lorsque les participants ne bénéficiaient pas des afférences visuelles dynamiques. Cependant, en présence de la vision dynamique du mouvement, une diminution significative du coefficient fut observée entre le pic de décélération et la fin du mouvement. À la lumière de ces données, il apparaît clairement que la première impulsion de mouvement peut être modulée en temps réel sur la base des informations visuelles dynamiques et dans une moindre mesure via la proprioception. D'ailleurs des données similaires montrant la possibilité de moduler en temps réel une première impulsion de mouvement ont été obtenues lors d'autres études utilisant des tâches de pointage manuel (Khan, Elliott, Coull, Chua, & Lyons, 2002; Khan, Lawrence, Fourkas, Franks, Elliott, & Pembroke, 2003a). Pris conjointement, l'ensemble de ces résultats va à l'encontre du principe d'impulsions de mouvement balistiques énoncé dans le modèle de Meyer et collaborateurs (1988).

Certaines différences expérimentales peuvent expliquer les différences de résultats obtenus entre les travaux de Meyer et ses collaborateurs et ceux de Proteau et ses collaborateurs. Deux de ces différences expérimentales vont être étudiées dans le présent chapitre.

Premièrement, Meyer et ses collaborateurs utilisaient une tâche contrainte de manière spatiale. Les participants devaient effectuer leur mouvement le plus vite

possible tout en s'assurant de terminer sur la cible. Il en résultait que plus de 90% des essais montraient une impulsion de correction. À l'inverse, Proteau et ses collaborateurs utilisaient une tâche contrainte de manière temporelle où les participants devaient effectuer leur mouvement vers des cibles de petit diamètre (2-4 mm) tout en respectant une fenêtre temporelle pré-déterminée. Les participants devaient être précis par rapport au temps de mouvement alloué, et on ne s'attendait pas à ce qu'ils complètent leur mouvement sur de si petites cibles. De plus, la configuration expérimentale établie par Proteau faisait que le mouvement était considéré comme terminé lorsque l'effecteur ne parcourait pas plus de 2 mm de distance en 50 ms. Ceci excluait toute possibilité de produire des corrections discrètes. Il est donc possible que dans les études menées par Proteau et ses collaborateurs, les participants modulent leur première impulsion de mouvement par ce que cela était la seule possibilité d'être précis tout en satisfaisant l'exigence temporelle de la tâche. Il est donc fondamental d'évaluer si la stratégie de contrôle mise en place dans les études de Proteau et de ses collaborateurs est inhérente au critère temporel imposé dans les tâches en plus de l'impossibilité de produire des corrections discrètes. Dans ce chapitre, nous allons donc étudier si la première impulsion de mouvement peut être modulée en temps réel dans le cadre d'une tâche contrainte de manière spatiale lorsque la production de corrections discrètes est possible. En second lieu, nous évaluerons ce qui différencie les mouvements nécessitant une impulsion de correction et ceux atteignant directement la cible.

En plus de vouloir répondre à des considérations théoriques relatives aux différences de résultats obtenues entre Meyer et Proteau, ce chapitre est un préambule aux études subséquentes d'adaptation aux verres progressifs. En effet, ce type de verres

généralisant des distorsions d'ordre spatial, il nous semblait fondamental de mieux comprendre les mécanismes de contrôles mis en place dans une tâche de pointage contrainte de manière spatiale.

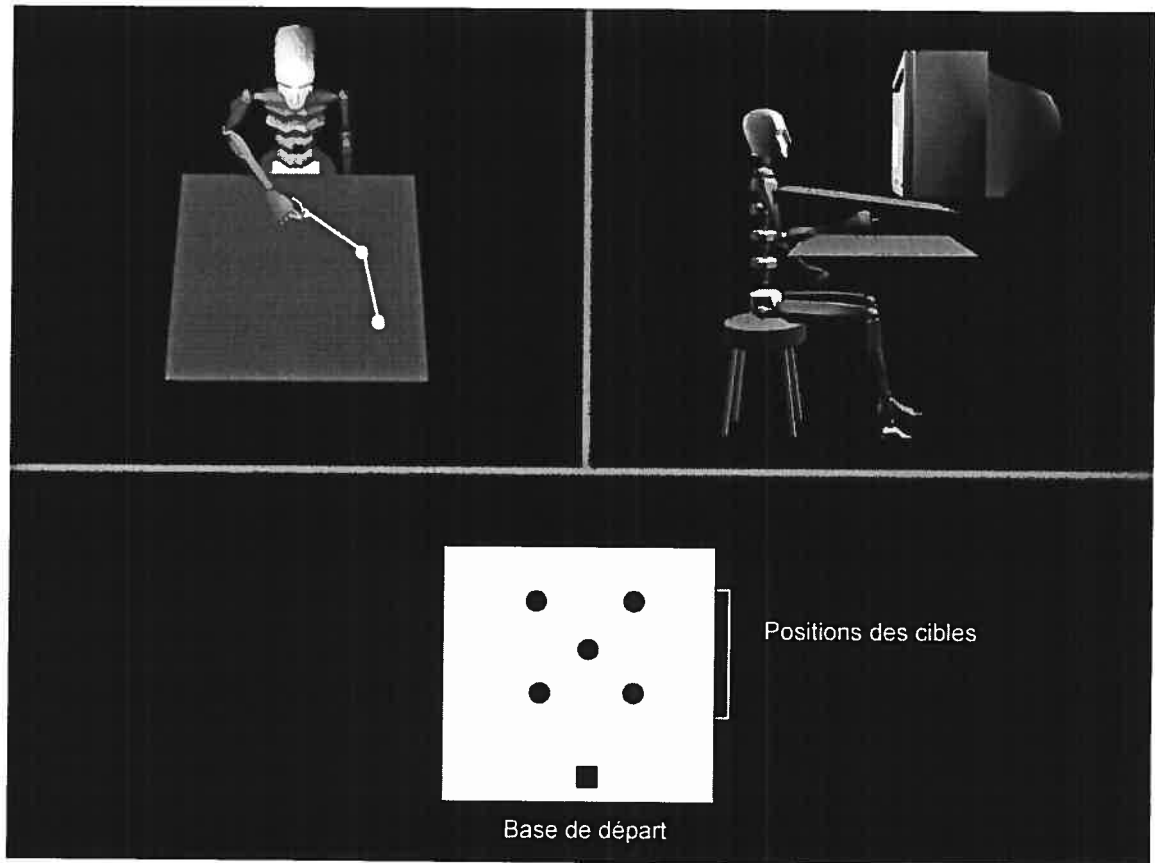
### Méthodologie

La configuration expérimentale, le déroulement expérimental, le matériel et la méthode sont tels que décrits dans la méthodologie générale. Des aspects expérimentaux spécifiques à ce protocole sont cependant à souligner.

#### Positions et tailles des cibles

Deux tailles (4 mm ou 50 mm) et cinq positions de cible étaient utilisées, les cibles étaient des cercles noirs présentés sur un fond d'écran blanc. Quatre des cinq cibles formaient les coins d'un carré tandis que la dernière cible était au centre de ce carré. La cible du centre était parfaitement alignée avec le centre de l'écran, la base de départ et l'axe sagittal médian du participant. Elle était située à 320 mm en avant de la base de départ. Les cibles inférieures étaient positionnées à  $7^0$  et à 288 mm à droite et à gauche de la base de départ, tandis que les cibles supérieures étaient positionnées à  $6^0$  et à 357 mm de la base de départ à droite et à gauche de la base de départ (figure 1).

Figure 1 : le montage expérimental.



### Groupes expérimentaux et condition de pratique

Les participants étaient répartis en quatre groupes ( $n = 10$ ). Ces groupes étaient différenciés par la taille de la cible à atteindre (4 mm ou 50 mm) et par l'information visuelle disponible durant l'acquisition (vision normale ou cible-seule). Tous les participants avaient une vision parfaite ou parfaitement corrigée. Pour le groupe vision normale, la vision du curseur était permise tout au long du mouvement tandis que pour les groupes cible-seule le curseur disparaissait à l'amorce du mouvement. Durant l'acquisition, la connaissance du résultat (CR) sur les dimensions spatiales du mouvement était affichée numériquement (i.e., étendue en mm et direction en degrés) et

graphiquement (la trajectoire de l'essai et la cible à atteindre étaient illustrées à l'écran). Le temps de mouvement était également présenté à l'écran.

#### Phases expérimentales.

Les participants prenaient part à une session expérimentale composée de deux phases; une phase d'acquisition et une phase de transfert. Dans chaque phase, l'ordre d'apparition des cibles était randomisé avec pour restriction de ne pas présenter plus de deux fois de suite la même cible durant un bloc de 10 essais consécutifs. Durant l'acquisition, les participants devaient effectuer 40 essais vers chacune des cinq cibles. Peu importe la condition de pratique, le participant voyait, à l'amorce de chaque essai, la position du curseur positionné sur la base de départ ainsi que la position de la cible à atteindre. Immédiatement à la suite de cette phase d'acquisition, les participants prenaient part à une phase de transfert. Les cibles utilisées étaient les mêmes que durant la phase d'acquisition et le nombre total d'essais était de 40 repartis pour les 5 cibles. La phase de transfert était effectuée en condition cible-seule et sans CR. L'unique session expérimentale était rémunérée 10\$ CDN et le comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé de l'université de Montréal a préalablement approuvé cette étude.

## Résultats

### Proportion d'atteinte de cible et essais comportant des corrections discrètes

Du fait de l'utilisation d'une tâche contrainte de manière spatiale, il était important d'évaluer dans quelle proportion les participants terminaient leur mouvement sur la cible. Nous avons également évalué la proportion d'essais comportant une correction discrète sur les composantes de direction ou d'étendue du mouvement. Pour la phase d'acquisition, ces données ont été soumises individuellement à une ANOVA contrastant deux conditions visuelles (vision normale, cible-seule) x 2 tailles de cibles (4 mm et 50 mm) x 5 positions de cible (supérieure droite, supérieure gauche, centrale, inférieure gauche et inférieure droite) avec des mesures répétées pour le dernier facteur. Pour la phase de transfert, il n'y avait que 8 essais par cible donc nous n'avons pas utilisé la position de cible comme facteur expérimental. Ces données de la phase de transfert ont été soumises à une ANOVA contrastant deux conditions visuelles (vision normale, cible-seule) x 2 tailles de cibles (4 mm vs. 50 mm).

Proportion d'atteinte de cible. L'ANOVA calculée sur la proportion d'essais ayant terminé sur la cible a révélé des effets significatifs de condition visuelle, de taille de cible ainsi qu'une interaction significative entre ces deux facteurs,  $F(1, 35) = 334.2$ ,  $53.2$ , et  $33.0$  respectivement. La décomposition de cette interaction a montré qu'en condition de vision normale les participants avaient un pourcentage d'atteinte de cible significativement plus élevé que les participants n'ayant bénéficiés que de la vision de la cible et ceci tant pour les petites cibles (91.2% vs. 4.3%) que pour les grandes cibles (96.8% vs. 51.5%). Cette interaction résultait du fait que la différence entre les deux

conditions visuelles était significativement plus grand lors de l'utilisation des petites cibles comparativement aux résultats obtenus pour les grandes cibles.

Pour la phase de transfert, l'ANOVA n'a révélé qu'un effet principal de taille de cible,  $F(1, 35) = 66.15$ , montrant un pourcentage d'atteinte significativement plus grand en présence des grandes cibles comparativement aux petites cibles (38.5% vs. 1.8%). Il faut aussi remarquer que les résultats de cette phase de transfert montrent que les participants qui avaient fait la phase d'acquisition en condition cible-seule (44.2%) avaient un pourcentage d'atteinte plus élevé que ceux qui avaient eu la vision dynamique de leur mouvement (32.8%) durant l'acquisition; cette différence n'était cependant pas significative.

Essais comportant une seconde impulsion corrective sur l'étendue du mouvement. Les résultats de la phase d'acquisition ont montré que les deux groupes cible-seule et le groupe vision-normale pour lequel les participants effectuaient leur mouvement vers de grosses cibles avaient 99% de leurs essais composés d'une impulsion unique de mouvement. Par contre, les participants ayant eu la vision normale du mouvement en présence de petites cibles ont montré 48.4% d'essais comportant au moins une correction discrète d'où résultait une interaction significative condition visuelle x taille de cible,  $F(1, 35) = 180.0$ . Une analyse supplémentaire a montré que 21% des essais de cette dernière condition comportaient aussi une impulsion de correction tertiaire.

Les résultats de la phase de transfert ont montré que moins de 1% des essais comportaient une correction discrète, et ceci pour l'ensemble des conditions expérimentales.

Proportion des essais comportant une seconde impulsion corrective sur la composante directionnelle. Sur la base des critères décrits dans le chapitre de méthodologie pour détecter l'occurrence d'une correction discrète, nous avons observé une grande proportion d'essais corrigés et ceci pour tous les groupes. Pour la phase d'acquisition, l'ANOVA montra que ces corrections étaient plus fréquentes en condition de vision normale comparativement à la condition cible-seule (71.3% vs. 46.8%),  $F(1, 35) = 27.5$ . L'ANOVA révéla également un effet principal de taille de cible montrant un nombre significativement plus grand d'essais montrant une correction discrète en présence des petites cibles (66.1%) comparativement aux résultats obtenus pour les grandes cibles (53.5%),  $F(1, 35) = 8.4$ . L'ANOVA effectuée lors de la phase de transfert ne révéla aucun effet principal ou d'interaction significatifs. Lors de la phase de transfert, 41% des essais montraient une correction discrète,  $F_s < 1$ .

Il apparaît cependant que le critère de détection des corrections discrètes utilisé pour la composante étendue du mouvement pourrait être moins approprié lorsqu'on l'applique à l'aspect directionnel du mouvement. Ainsi, des mouvements courbes seraient considérés comme ayant au moins une correction discrète même si ce profil de trajectoire résulte uniquement de contraintes biomécaniques (Desmurget, Jordan, Prablanc, & Jeannerod, 1997). Pour cette raison, nous avons réalisé une deuxième série d'analyses incluant un critère supplémentaire pour caractériser une correction discrète de type directionnel. Pour qu'une correction directionnelle soit détectée, il fallait qu'il soit observé une réduction de la distance retrouvée entre le curseur et le vecteur de référence de mouvement (vecteur joignant le centre de la base de départ au centre de la cible). L'utilisation de ce critère résulte en une diminution dramatique de la proportion d'essais



montrant une correction discrète sur cette dimension et particulièrement pour la condition cible-seule. L'ANOVA calculée sur les données obtenues suite à l'inclusion de ce nouveau critère révéla des effets principaux de condition visuelle et de taille de cible avec une interaction significative entre ces deux facteurs,  $F(1, 35) = 40.6, 9.8,$  et  $6.7,$  respectivement. La décomposition de cette interaction a montré, qu'en condition de vision normale on observait une proportion d'essais corrigés significativement plus élevée qu'en condition de vision de la cible et ceci tant pour les petites cibles (58.3% vs. 13.3%) que pour les grandes cibles (29.6% vs. 10.6%). Cette interaction était due à la plus grande différence observée pour les groupes en présence de petites cibles. L'ANOVA calculée pour la phase de transfert ne montra aucun effet principal ou d'interaction significatifs ( $F_s < 1$ ), et la proportion moyenne d'essais montrant des corrections discrètes était de 12%.

Résumé. Les résultats montrent que lorsque la vision normale du mouvement était permise on observait une grande proportion d'essais terminés sur la cible. De plus, cette performance était obtenue sans évidence de correction discrète lorsque les participants effectuaient leur mouvement vers des cibles de gros diamètre (50 mm). Par contre, plus de 50% des essais produits vers les cibles de 2 mm montraient des corrections discrètes. Les résultats obtenus dans cette première section d'analyse montrent aussi que les groupes ayant pratiqué en condition cible-seule ne produisaient pas de corrections discrètes efficaces tant en acquisition qu'en transfert.

Analyse cinématique du mouvement : analyse sur la composante étendue du mouvement pour les essais à impulsion unique

Les résultats de la première série d'analyses ont montré que seuls les participants qui exécutaient leur mouvement en condition de vision normale vers de petites cibles avaient produit des corrections discrètes pour terminer leur mouvement sur la cible. Dans la présente analyse, nous avons voulu déterminer la stratégie de contrôle utilisée par les participants pour les essais ayant atteint la cible sans correction discrète. Spécifiquement, nous avons voulu vérifier si les participants avaient pu atteindre la cible sur la base d'une modulation en temps réel du mouvement ou sur la base d'une planification du mouvement hautement efficace. En second lieu, nous avons voulu évaluer la raison pour laquelle les groupes qui n'avaient pas la vision dynamique du mouvement avaient une faible proportion d'essais se terminant sur la cible. Était-ce dû à une mauvaise planification ou à l'impossibilité de moduler le mouvement du fait de l'absence d'afférences visuelles dynamiques.

Pour répondre à ces questions, nous avons étudié l'occurrence spatiale et temporelle des pics cinématiques (accélération, vitesse, décélération et position terminale) pour l'ensemble des essais n'ayant montré aucune correction discrète. Plus précisément, nous avons déterminé la longueur et l'orientation du vecteur de mouvement à chacun de ces marqueurs cinématiques. Pour l'orientation du mouvement, nous avons analysé la distance (en mm) entre le vecteur de référence et le vecteur joignant la base de départ au centre du curseur à chaque pic cinématique. Finalement, pour normaliser la variabilité intra-sujet à chaque marqueur cinématique, nous avons calculé les coefficients de variabilité sur l'orientation et l'étendue du mouvement ([variabilité intra-

sujet à chaque marqueur cinématique]/[longueur du vecteur de mouvement au marqueur considéré]).

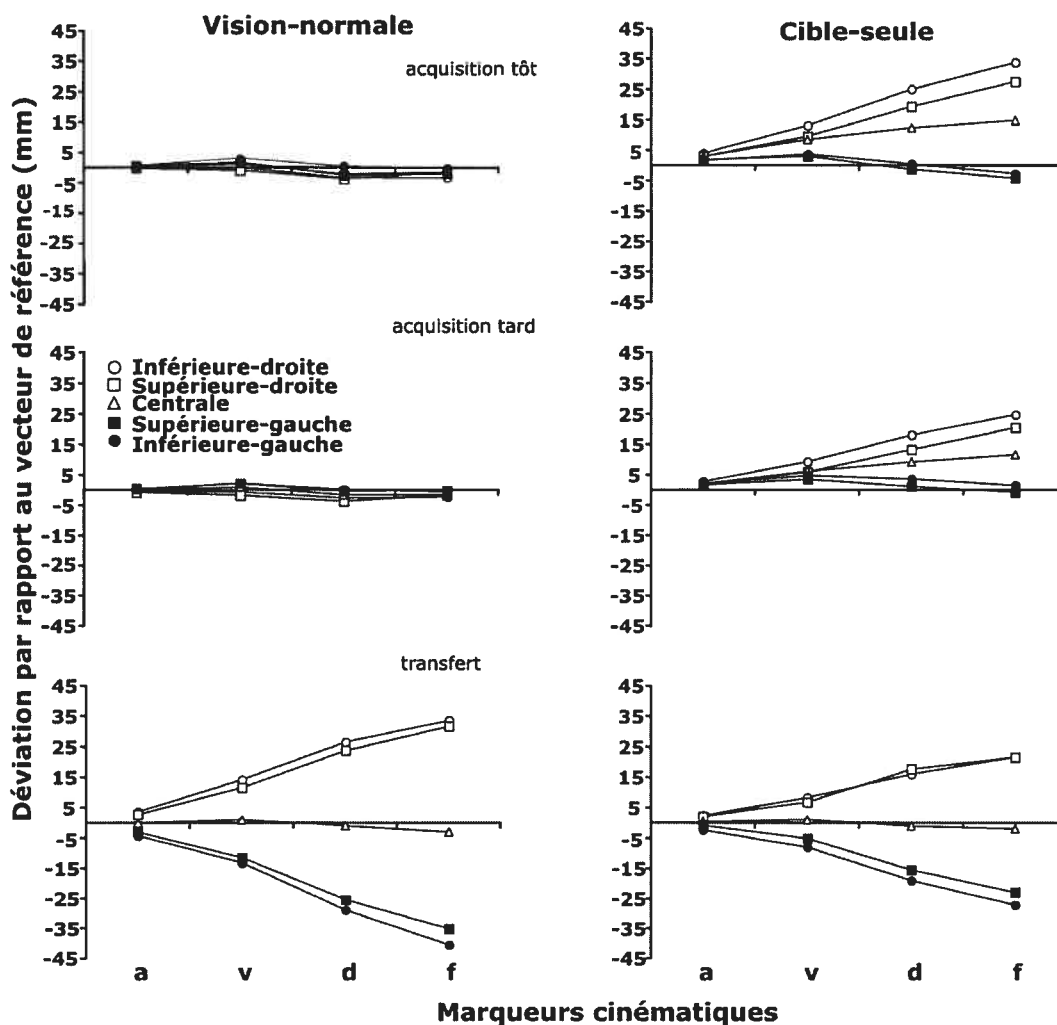
Ces variables dépendantes ont été soumises individuellement à une ANOVA contrastant deux conditions visuelles (vision normale, cible-seule) x 2 tailles de cible (4 mm, 50 mm) x 5 positions de cible x 3 phases expérimentales (acquisition tôt, acquisition tard et transfert) x 4 marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération et position terminale) avec des mesures répétées pour les trois derniers facteurs. Pour chaque cible, les huit premiers et les huit derniers essais ne comportant pas de correction discrète formaient respectivement le bloc précoce ou tardif de la phase d'acquisition. Les données d'un participant ayant pratiqué en vision normale vers les petites cibles ont été retirées de l'analyse car pour certaines cibles tous ses mouvements comportaient des corrections discrètes.

Déviations du vecteur de mouvement par rapport au vecteur de référence. Les résultats de l'ANOVA ont montré des effets principaux de condition visuelle,  $F(1, 34) = 5.4$ , de phase expérimentale  $F(2, 68) = 4.6$ , et de position de cibles,  $F(4, 136) = 75.8$ , ainsi qu'une série d'interactions à une voie et deux voies supplantées par une interaction significative condition visuelle x phase expérimentale x position de cible x marqueur cinématique  $F(24, 816) = 23.1$ . Cette interaction est illustrée à la figure 2.

La décomposition de cette interaction montra les éléments suivants. Tôt dans l'acquisition, les participants bénéficiant de la vision dynamique du mouvement déviaient très peu du vecteur de référence et ceci quelle que soit la position de cible. En comparaison, pour les participants des groupes cible-seule, les mouvements dirigés vers les cibles de droite et la cible centrale déviaient à droite des vecteurs de référence

respectifs. Ce type de biais par rapport au vecteur de référence ne s'observait pas pour les mouvements exécutés vers les cibles situées à gauche. Ces résultats s'expliquent par le fait qu'une large proportion de participants terminait leur mouvement à droite des cibles situées à droite et au centre alors que le biais était distribué de part et d'autre des cibles positionnées à gauche.

Figure 2 : déviation des vecteurs aux différents marqueurs cinématiques.



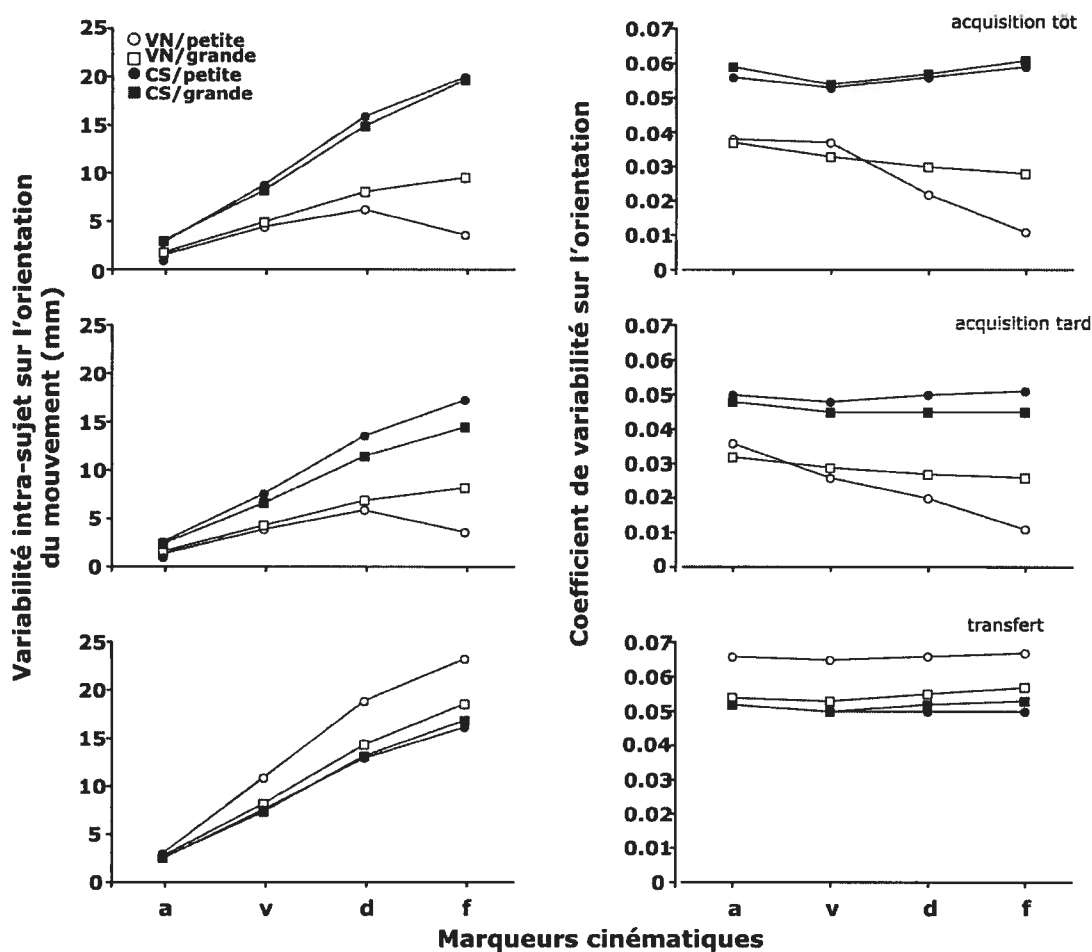
Une quantité de pratique supplémentaire ne modifia les résultats obtenus en début de pratique que sur un seul aspect. En effet, les biais observés pour les mouvements dirigés vers les cibles centrales et les cibles situées à droite diminuèrent tout en gardant des valeurs supérieures à celles obtenues pour les participants des groupes cible-seule.

Retirer uniquement la CR lors de la phase de transfert (groupes cible-seule) n'avait aucun impact sur les trajectoires des mouvements dirigés vers les cibles de droite; les trajectoires étaient toujours biaisées à droite du vecteur de référence. Par contre, il fut observé une déviation significative à gauche du vecteur de référence pour les mouvements dirigés vers les cibles localisées à gauche. Dans tous les cas, la déviation augmentait en fonction du déroulement du mouvement. Aucun biais particulier ne fut observé pour les mouvements dirigés vers les cibles centrales.

Retirer la vision lors de la phase de transfert (groupes vision normale) résultait en une déviation croissante par rapport au vecteur de mouvement et ceci en fonction de la distance parcourue. Comparativement aux résultats de l'acquisition, les mouvements dirigés vers les cibles de droite étaient déviés à droite du vecteur de référence tandis que les mouvements dirigés vers les cibles de gauche étaient déviés à gauche du vecteur de référence; aucun biais ne fut observé pour les cibles centrales. Finalement, les déviations observées pour les groupes vision-normale ne se différenciaient pas significativement de celles enregistrées pour les groupes cible-seule.

Variabilité intra-sujet sur l'orientation du vecteur de mouvement. L'ANOVA calculée a révélé des effets principaux de condition visuelle,  $F(1, 34) = 21.8$ , de phase expérimentale,  $F(2, 68) = 31.1$ , et de marqueurs cinématiques,  $F(3, 102) = 596.17$ , ainsi qu'une série d'interaction significative à une voie et deux voies supplantées par une interaction significative condition visuelle x taille de cible x marqueur cinématique x phase expérimentale  $F(6, 204) = 8.35$ . Cette interaction est présentée sur la portion gauche de la figure 3 et sa décomposition a donné les résultats suivants.

Figure 3 : variabilité intra-sujet et coefficient de variabilité sur l'orientation du vecteur aux différents marqueurs cinématiques.



Tôt dans l'acquisition (graphique supérieur gauche de la figure), la variabilité de l'orientation du vecteur augmente significativement entre le pic d'accélération et le pic de décélération. Ceci est valable tant pour les groupes vision normale (de 1.8 mm à 7.1 mm) que pour les groupes cible-seule (de 2.9 mm à 15.5 mm). Cette augmentation de la variabilité était significativement plus importante pour les groupes cible-seule que pour les groupes vision-normale. La variabilité de l'orientation du vecteur de mouvement continua à augmenter entre le pic de décélération et la fin du mouvement pour les groupes cible-seule (moyenne de 19.6 mm) mais également pour le groupe vision-normale ayant pratiqué avec les cibles de gros diamètre (9.6 mm). Par contre, une diminution significative de cette variabilité fut notée pour le groupe vision-normale/petite-cible (3.6 mm). Cette chute significative de la variabilité obtenue pour les petites cibles comparativement aux grosses cibles reflète l'aspect fonctionnel de cette baisse de variabilité qui est basée sur le traitement des afférences visuelles dynamiques. En passant du début à la fin de la phase d'acquisition, les résultats ne montrent aucune différence significative de la variabilité sur l'orientation du mouvement pour les participants des groupes vision-normale (graphique central de la partie gauche de figure 3). Par contre, les données des groupes cible-seule ont montré une réduction de variabilité entre ces deux phases expérimentales. Cette réduction de variabilité était apparente très tôt dans le mouvement (pic d'accélération) et atteignait des différences statistiquement significatives à partir du pic de vitesse et ceci jusqu'en fin de mouvement.

En passant de la fin de la phase d'acquisition à la phase de transfert (partie inférieure gauche de la figure 3), aucune différence de variabilité par rapport à ce qui

vient d'être décrit ne fut enregistrée pour les groupes cible-seule. Par contre, les résultats des groupes vision-normale ont montré que durant la phase de transfert, la variabilité de l'orientation du vecteur augmentait significativement d'un marqueur cinématique à l'autre et ceci tant pour les petites cibles (3.0 mm à 23.3 mm) que pour les grandes cibles (2.7 mm à 18.5 mm) les augmentations étaient largement supérieures à celles observées à celles observées lors de la phase d'acquisition. Finalement, lors du transfert, la variabilité observée au sein du groupe vision-normale petite-cible était significativement plus élevée que celle observée pour les trois autres groupes qui ne se différenciaient pas entre eux (aux marqueurs de vitesse, de décélération et en fin de mouvement).

Coefficient de variabilité sur l'orientation du mouvement (COV). L'ANOVA calculée sur le COV pour la phase d'acquisition a révélé des effets principaux de condition visuelle,  $F(1, 34) = 17.2$ , de phase expérimentale,  $F(2, 68) = 28.3$ , de position de cible,  $F(4, 136) = 8.3$ , et de marqueurs cinématiques,  $F(3, 102) = 26.7$ , ainsi qu'une série d'interaction significative à une voie et deux voies supplantées par une interaction significative condition visuelle x taille de cible x marqueur cinématique x phase expérimentale,  $F(6, 204) = 6.53$ . Cette interaction est présentée sur la portion droite de la figure 3 et sa décomposition a montré les résultats suivants.

Tôt dans l'acquisition (partie supérieure-droite de la figure 3) les données montrent qu'indépendamment de la taille de cible et du pic cinématique, le COV était significativement plus petit pour les groupes vision-normale que pour les groupes cible-seule. Aucune différence significative ne fut enregistrée en fonction de la taille de cible ou des pics cinématiques pour les participants des groupes cible-seule. Par contre, au sein des groupes vision-normale, le COV diminuait significativement d'un marqueur



cinématique à l'autre pour le groupe petite-cible tandis que pour le groupe grosse-cible une diminution significative fut enregistrée entre le pic d'accélération et le pic de vitesse; diminution suivie d'une stabilisation jusqu'en fin de mouvement. Les résultats des groupes vision suggèrent de nouveau une diminution de la variabilité basée sur un mécanisme fonctionnel utilisant le traitement des afférences visuelles disponibles. On observe en effet pour les positions terminales, un COV significativement plus petit pour le groupe vision-normale/petite-cible comparativement à celui du groupe vision-normale/grosse-cible. Ces profils de variabilité restent identiques en fin d'acquisition malgré une variabilité diminuée par la quantité de pratique (partie centrale de la portion droite de la figure 3).

Lors de la phase de transfert (partie inférieure-droite de la figure 3), le COV des groupes vision-normale augmenta de manière significative comparativement au niveau obtenu en fin d'acquisition et ceci de manière plus marquée pour le groupe petite-cible. Les résultats de la phase de transfert montrent également pour l'ensemble des groupes que le COV reste stable d'un marqueur cinématique à un autre. Ces résultats relatifs au COV suggèrent clairement que l'information visuelle dynamique joue un rôle plus important dans la précision de mouvements dirigés vers de petites cibles comparativement à ce que l'on observe pour des mouvements dirigés vers de grandes cibles. De plus, ces informations visuelles dynamiques sont cruciales pour l'efficacité des mécanismes de contrôle en temps réel du mouvement.

Résumé des données relatives à l'orientation du mouvement. Lors de la phase d'acquisition, les résultats ont montré que les participants avaient une déviation minimale de leur mouvement par rapport au vecteur de référence lorsqu'ils bénéficiaient de la

vision dynamique de l'effecteur. Ces déviations minimales s'accompagnaient de petits COV dès l'occurrence des pics d'accélération, indiquant la présence de mécanismes de planification précis et adaptés. De plus, les COV des groupes vision-normale diminuaient au fur et à mesure de la progression du mouvement, indiquant ainsi l'implication de processus de modulation de l'impulsion initiale de mouvement. Une diminution plus marquée des COV était observée pour les mouvements dirigés vers de petites cibles. Cette diminution plus franche observée en présence des petites cibles reflétait un mécanisme fonctionnel basé sur le traitement des afférences visuelles disponibles. Ceci est confirmé lors du transfert où l'augmentation des COV est plus marquée pour le groupe vision-normale petite-cible que pour le groupe vision-normale grosse-cible. À l'opposé, les résultats des groupes cible-seule montraient de grands biais directionnels résultant d'une planification grossière ainsi que l'absence de processus efficaces de modulation du mouvement en temps réel caractérisée par l'augmentation quasi linéaire de la variabilité intra-sujet en fonction de l'amplitude du mouvement.

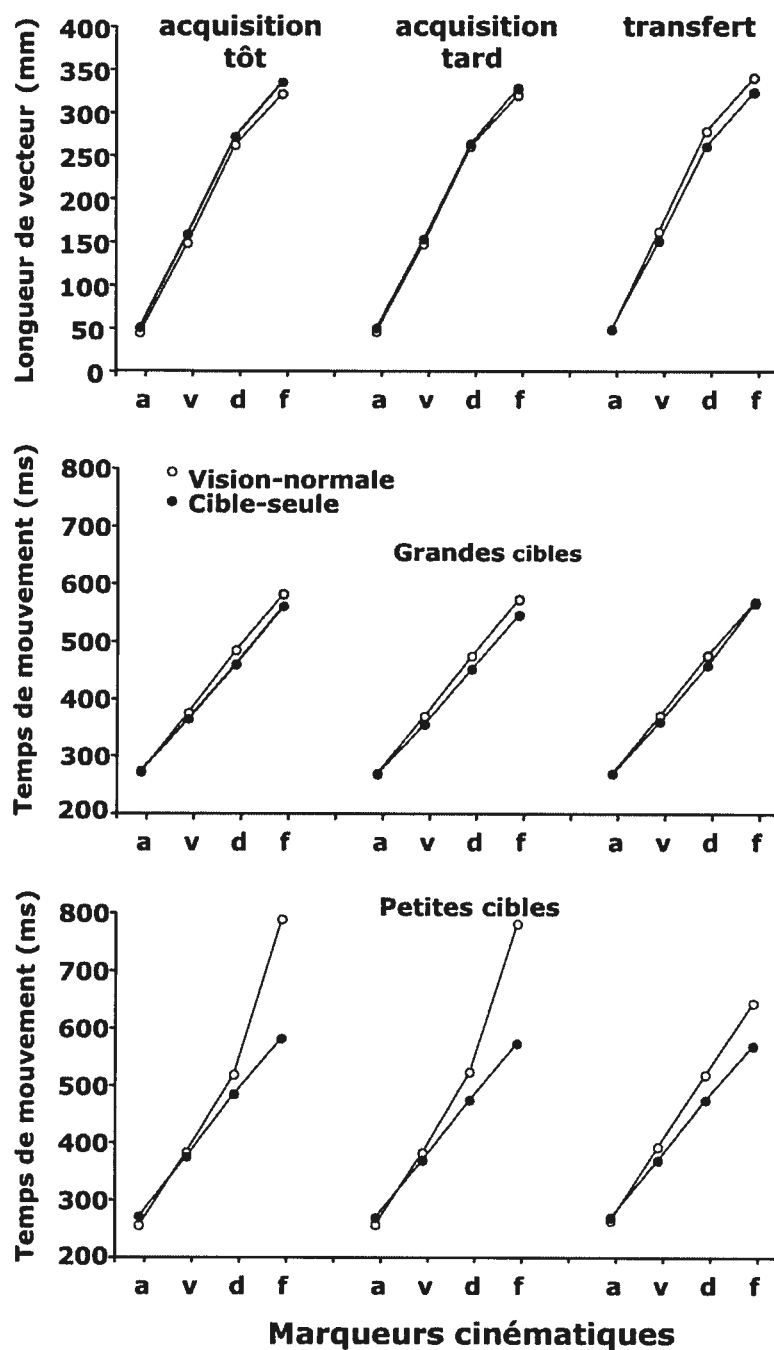
Composante étendue du vecteur de mouvement. L'ANOVA calculée sur cette variable a montré des effets principaux de position de cible,  $F(4, 136) = 587.5$ , et de marqueurs cinématiques,  $F(3, 102) = 1498.5$ , ainsi qu'une série d'interactions significatives à une voie et deux voies supplantées par des interactions significatives marqueur cinématique x taille de cible,  $F(3, 102) = 14.2$ , condition visuelle x marqueur cinématique x phase expérimentale,  $F(6, 204) = 6.58$ .

La décomposition de la première interaction a montré que l'occurrence spatiale du pic d'accélération était significativement plus tardive pour les mouvements dirigés vers de petites cibles comparativement aux résultats obtenus avec de grosses cibles. Par

contre, ce comportement s'inverse pour les pics de décélération ainsi que pour les positions terminales,  $F(3, 102) = 14.24$ .

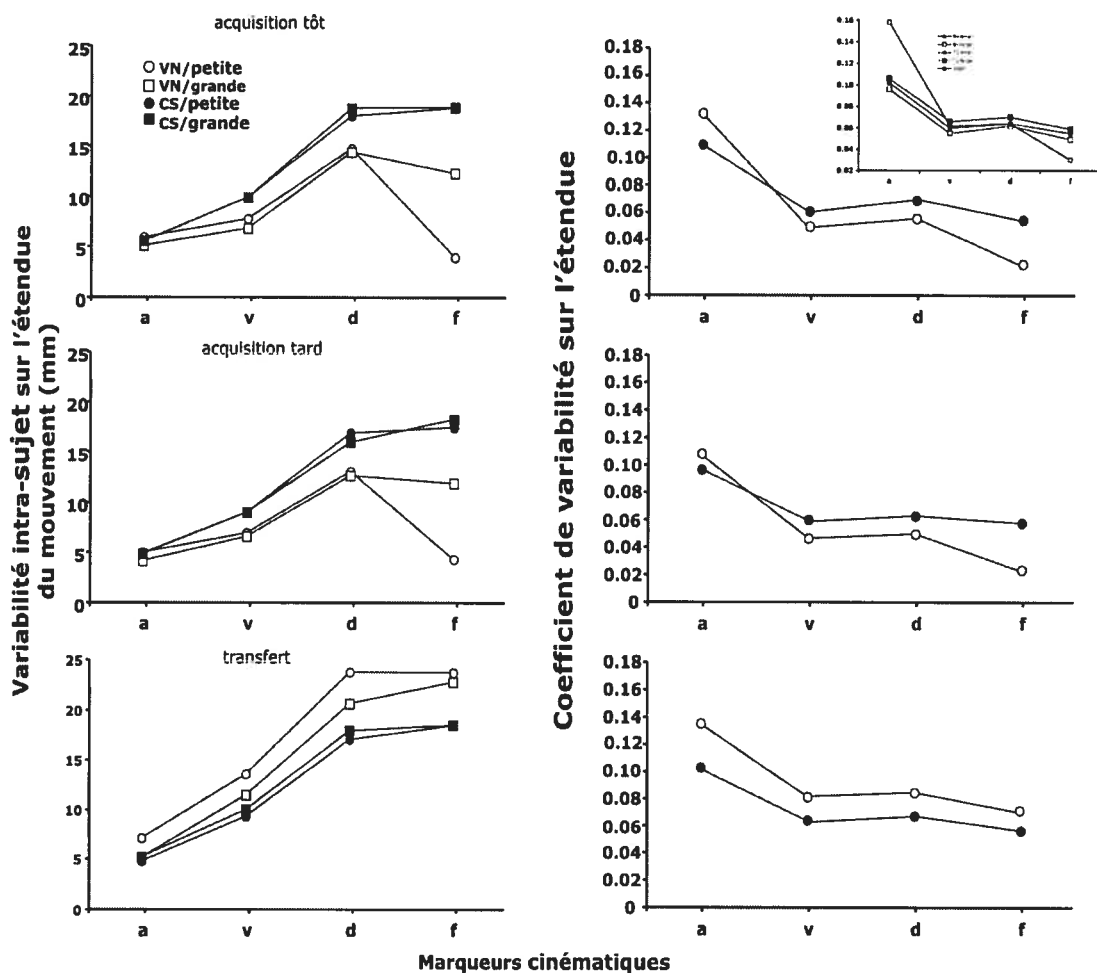
L'interaction condition visuelle x marqueur cinématique x phase expérimentale est illustrée dans la portion supérieure de la figure 4. La décomposition de cette interaction montra que tôt dans l'acquisition, l'occurrence spatiale de chaque marqueur cinématique se produisait significativement plus loin de la base de départ pour les groupes cible-seule que pour les groupes vision-normale ( $\approx 10$  mm). Tard dans l'acquisition, le même comportement était observé avec toutefois un moindre écart entre les deux conditions visuelles ( $\approx 5$  mm). Passer de l'acquisition au transfert n'avait aucune incidence sur l'occurrence spatiale des marqueurs cinématiques pour les groupes cible-seule. À l'inverse, retirer la vision aux groupes vision-normale entraînait par une augmentation de la longueur des vecteurs de mouvement du pic de vitesse jusqu'en fin de mouvement. De plus, lors du transfert, ces marqueurs cinématiques se produisaient significativement plus loin de la base de départ pour les groupes vision-normale que pour les groupes cible-seule (figure 4).

Figure 4: Occurrence spatiale et temporelle aux différents marqueurs cinématiques durant l'acquisition et le transfert.



Variabilité intra-sujet sur l'étendue du mouvement. L'ANOVA calculée sur cette variable a révélé des effets principaux de condition visuelle,  $F(1, 34) = 8.3$ , de phase expérimentale,  $F(2, 68) = 51.3$ , et de marqueurs cinématiques,  $F(3, 102) = 452.9$ , ainsi qu'une série d'interactions significatives à une voie et deux voies supplantées par une interaction significative condition visuelle x taille de cible x marqueur cinématique x phase expérimentale,  $F(6, 204) = 3.4$ . Cette interaction est illustrée à la figure 5.

Figure 5: variabilité intra-sujet et coefficient de variabilité aux différents marqueurs cinématiques lors des trois phases expérimentales (la vignette représente les données de Proteau et Isabelle (2002) obtenues pour les groupes vision-normale et cible-seule).



La décomposition de cette interaction montre que tôt dans l'acquisition (panneau supérieur gauche de la figure), la variabilité sur l'étendue augmente entre le pic d'accélération et le pic de décélération tant pour les groupes vision-normale (de 5.5 mm à 14.6 mm) que pour les groupes cible-seule (de 5.6 mm à 18.4 mm). Cette augmentation était plus marquée pour les groupes cible-seule que pour les groupes vision-normale. Du pic de décélération à la fin du mouvement, la variabilité demeura stable pour les groupes cible-seule (18.9 mm) alors qu'une diminution significative fut enregistrée entre ces deux marqueurs pour les groupes vision-normale. De plus, la diminution significative de la variabilité au sein des groupes vision-normale entre les deux derniers marqueurs cinématiques était plus marquée pour les petites cibles (2.8 mm) que pour les grandes cibles (12.8 mm). Finalement, la quantité de pratique n'avait pas d'influence sur les niveaux de variabilité enregistrés entre le début et la fin de l'acquisition (panneau centre gauche de la figure 5).

La variabilité sur l'étendue ne changea pas de manière significative de l'acquisition au transfert pour les groupes cible-seule. Par contre, pour les groupes vision-normale, la chute de variabilité observée entre le pic de décélération et la fin du mouvement lors de l'acquisition ne prenait plus place en transfert (variabilité des positions terminales de 23.3 mm; panneau inférieur gauche de la figure 5). Finalement, lors de la phase de transfert et de l'utilisation de petites cibles, le niveau de variabilité sur l'étendue était significativement plus élevé pour le groupe vision-normale/petite-cible que pour les groupes cible-seule. Aucune différence significative relative à la condition visuelle ne fut observé pour les mouvements dirigés vers les grosses cibles.

Coefficient de variabilité sur l'étendue du mouvement (CEV). L'ANOVA calculée sur le CEV a révélé des effets principaux de phase expérimentale,  $F(2, 68) = 25.6$ , de position de cible,  $F(4, 136) = 12.6$ , et de marqueurs cinématiques,  $F(3, 102) = 181.7$ . Des interactions significatives condition visuelle x taille de cible x marqueur cinématique,  $F(3, 102) = 15.5$ , et condition visuelle x phase expérimentale x marqueur cinématique,  $F(6, 204) = 3.8$ , ont également été révélées par cette analyse.

L'interaction condition visuelle x phase expérimentale x marqueur cinématique est illustrée sur la figure 5 (côté droit). Tôt dans l'acquisition (cadran supérieur de la figure) le CEV des groupes cible-seule diminue faiblement mais de manière significative entre le pic d'accélération et le pic de vitesse; aucun autre changement n'est à noter jusqu'en fin de mouvement. À l'occurrence du pic d'accélération, les groupes vision-normale ont un CEV significativement plus élevé que celui observé pour les groupes cible-seule. Cette différence significative entre les deux conditions visuelles au pic d'accélération résultait de la valeur très élevée du CEV enregistré pour le groupe vision-normale/petite-cible. Pour les groupes vision normale, on observe une diminution significative du CEV entre le pic d'accélération et le pic de vitesse puis entre le pic de décélération et la fin du mouvement. Pour les trois derniers marqueurs cinématiques, le CEV était significativement plus faible pour les groupes vision-normale que pour les groupes cible-seule. Ces observations demeurent valables en fin d'acquisition malgré une diminution de la variabilité des groupes cible-seule (figure 5, panneau intermédiaire droit). Par contre, un changement de profil de variabilité se produit entre la fin de l'acquisition et la phase de transfert pour les groupes vision-normale. En effet, durant la phase de transfert (figure 5, panneau inférieur droit), les CEV des groupes vision-

normale augmentent de manière significative par rapport aux valeurs de fin d'acquisition et atteignent des niveaux supérieurs à ceux enregistrés pour les groupes cible-seule; différences significatives seulement aux pics d'accélération et en fin de mouvement.

La décomposition de l'interaction (non-illustrée) condition visuelle x taille de cible x marqueur cinématique révéla que tôt dans l'acquisition, le CEV était significativement plus faible au sein du groupe vision-normale/petite-cible (6.6 %) comparativement aux valeurs obtenues pour les trois autres groupes expérimentaux qui ne se différenciaient pas entre eux (moyenne de 21.7 %). La quantité de pratique permit à ces trois groupes d'atteindre, en fin d'acquisition, un niveau de variabilité identique à celui du groupe vision-normale/petite-cible (moyenne de 7.7 %). Le passage de l'acquisition au transfert eut pour seule conséquence de doubler le CEV du groupe vision-normale/petite-cible qui devint significativement plus élevé que celui obtenu pour le groupe cible-seule/petite-cible (respectivement 10.3% et 7.1%).

Occurrence temporelle des marqueurs cinématiques. L'ANOVA calculée sur cette variable a montré des effets principaux de condition visuelle,  $F(1, 34) = 30.3$ , de taille de cible,  $F(1, 34) = 28.14$ , de phase expérimentale,  $F(2, 28) = 8.45$ , de position de cible,  $F(4, 136) = 97.14$ , et de marqueurs cinématiques,  $F(3, 102) = 2074.34$ , ainsi qu'une série d'interactions significatives à une voie et deux voies supplantées par une interaction significative condition visuelle x taille de cible x marqueur cinématique x phase expérimentale,  $F(6, 204) = 21.74$ . Cette interaction est illustrée à la figure 4 (graphiques central et inférieur).

La décomposition de cette interaction a révélé que pour les trois phases expérimentales, l'occurrence temporelle de l'ensemble des marqueurs cinématiques était



la même pour les groupes vision-normale/grosse-cible et cible-seule/grosse-cible. Pour les mouvements dirigés vers de petites cibles, on remarque que l'occurrence temporelle des pics de décélération (différence de 54 ms) et des positions terminales (différence de 220 ms) était significativement plus tardive, en début d'acquisition, dans le groupe vision-normale comparativement au groupe cible-seule. Cet écart significatif s'observait également en fin d'acquisition avec une différence plus marquée (respectivement 73 ms et 245 ms au pic de décélération et en fin de mouvement) entre ces deux groupes. Il en était de même en transfert avec cependant une atténuation de l'écart temporel entre le groupe vision-normale et cible-seule (respectivement 58 ms et 82 ms au pic de décélération et en fin de mouvement). Pour la variable étudiée, cette interaction a également montré, au cours des trois phases expérimentales, un comportement identique entre le groupe vision-normale/grosse-cible et les deux groupes cible-seule. Finalement, l'effet principal de position de cible montra simplement que le temps requis pour atteindre une cible était fonction de la distance à parcourir.

Résumé des résultats de la composante étendue du mouvement. Les résultats des groupes cible-seule ont révélé pour l'impulsion initiale du mouvement que la variabilité sur l'étendue augmentait linéairement lors de l'exécution du mouvement, suggérant ainsi des mouvements reposant uniquement sur des processus de planification. À l'opposé, une diminution significative de la variabilité en étendue entre le pic de décélération et la fin du mouvement fut révélée pour les groupes bénéficiant des afférences visuelles dynamiques. Ceci suggère une modulation de la première impulsion de mouvement en présence des afférences visuelles dynamiques. De plus, cette modulation était plus marquée pour les mouvements dirigés vers les petites cibles comparativement à la

modulation observée pour les mouvements dirigés vers de grosses cibles. Cependant, il y avait un coût temporel pour la modulation plus prononcée observée au sein du groupe vision-normale/petite-cible. Ce coût temporel était caractérisé par un allongement du temps séparant le pic de décélération de la fin de cette première impulsion de mouvement. Ce coût temporel ne fut pas observé dans les trois autres groupes. Passer de l'acquisition à la phase de transfert n'eut aucun impact sur la performance des groupes cible-seule. Par contre, on observa un allongement des mouvements et une augmentation de la variabilité pour les groupes vision-normale avec une augmentation plus marquée pour le groupe petite-cible. Cette performance des groupes vision-normale lors de la phase de transfert indique une perte de précision et de consistance dans la planification du mouvement ainsi qu'une modulation moins efficace.

Comparaison des premières impulsions des mouvements avec et sans correction discrète : groupe vision-normale/petite-cible

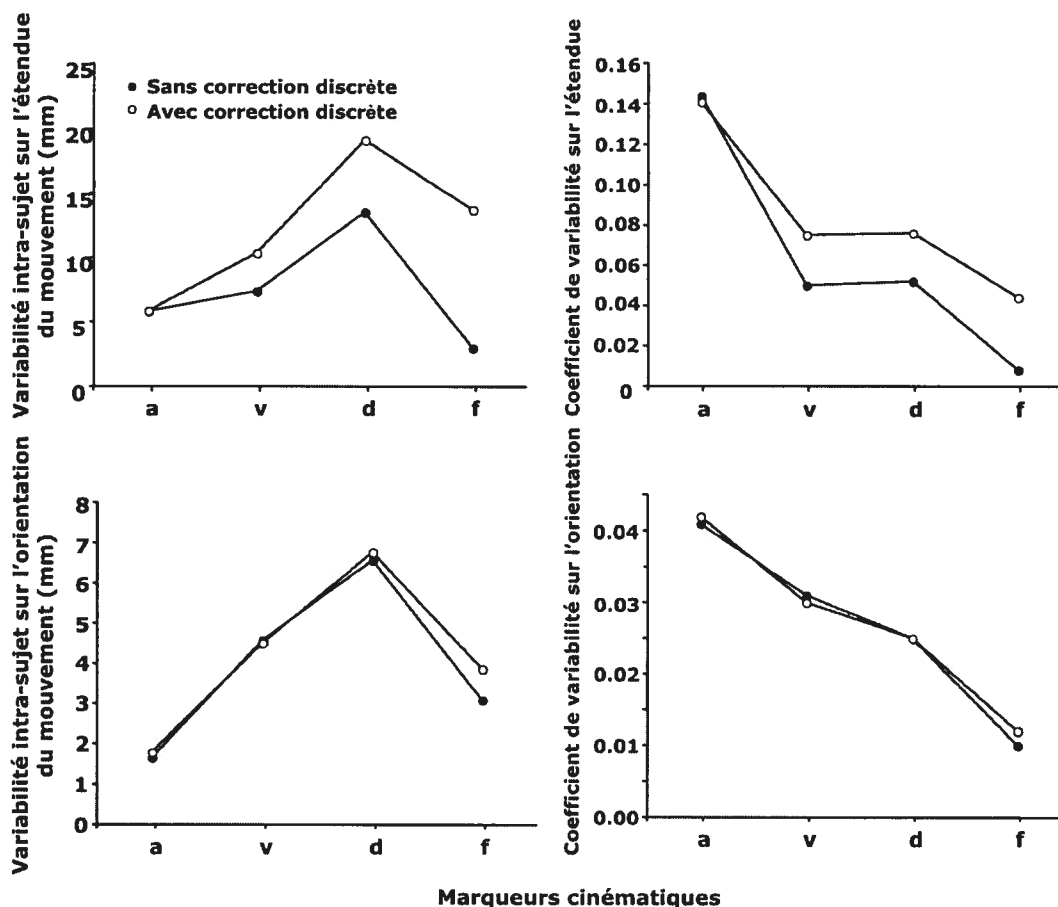
Au sein du groupe vision-normale/petite-cible, 50% des essais comportaient une correction discrète sur la composante en étendue du mouvement. Nous avons donc voulu déterminer les particularités des premières impulsions des mouvements qui étaient suivis d'une correction discrète. Pour cela, nous avons comparé l'occurrence spatiale et temporelle de chaque marqueur cinématique des premières impulsions des essais corrigés et des essais à impulsion unique. Nous avons également pour ces deux types d'essais comparé la variabilité intra-sujet et les coefficients de variabilité sur l'étendue et l'orientation du mouvement. Chaque variable dépendante fut soumise individuellement à une ANOVA contrastant 2 types d'essais (corrigés et non-corrigés) x 2 phases expérimentales (tôt et tard dans l'acquisition) x 4 marqueurs cinématiques (pics

d'accélération, vitesse, décélération et fin de la première impulsion de mouvement) avec des mesures répétées pour les trois derniers facteurs. Notons que seulement 6 participants du groupe vision-normale/petite-cible avaient suffisamment d'essais des deux types pour être inclus dans cette analyse.

Les résultats de cette analyse ne révélèrent que deux différences associées au type d'essais considéré. Plus précisément, on observa une interaction significative type d'essais x marqueur cinématique pour la variabilité intra-sujet sur l'étendue du mouvement,  $F(3, 15) = 11.20$ , ainsi que pour le CEV,  $F(3, 15) = 5.00$ . Ces interactions sont illustrées à la figure 6 (cadrans supérieurs droit et gauche de la figure). Concernant la variabilité intra-sujet, la décomposition de l'interaction a révélé une variabilité significativement plus élevée du pic de vitesse à la fin du mouvement pour la première impulsion des essais corrigés. Cette différence observée entre les deux catégories d'essais augmentait d'un marqueur cinématique à l'autre. L'interaction concernant le CEV montra une variabilité significativement plus petite pour la première impulsion des essais non corrigés et ceci au pic de vitesse mais également au pic de décélération et à la fin du mouvement. Cette différence était plus marquée en fin de mouvement que pour les deux autres marqueurs cinématiques.

Les cadrans inférieurs de la figure 6 illustrent la variabilité intra-sujet sur l'orientation du mouvement ainsi que le COV pour les essais corrigés et non-corrigés. Aucune différence significative n'apparaît pour ces deux variables relativement au type d'essais (corrigé ou non corrigé); ce qui suggère une indépendance du contrôle de l'étendue et de l'orientation du mouvement lors des tâches d'atteinte manuelle.

Figure 6: Variabilité sur l'orientation et sur l'étendue pour les essais avec et sans correction discrète.



Résumé de la comparaison des premières impulsions des essais corrigés ou non-corrigés. Les impulsions initiales des essais se terminant directement sur la cible et celles des essais corrigés différaient peu les unes des autres. Leur longueur moyenne, leur orientation ainsi que leurs temps de mouvement étaient similaires. Ceci signifie que ces essais ne surestimaient ni ne sous-estimaient les cibles et n'étaient pas systématiquement biaisés dans une direction ou une autre. Cependant, les essais corrigés étaient plus variables que les essais ne nécessitant aucune correction discrète. Ce dernier

résultat montre la difficulté qu'avaient les participants à paramétrer l'étendue du mouvement d'un essai à l'autre possiblement à cause de l'utilisation de trois amplitudes de mouvement différentes. Il semble donc que des corrections discrètes sont requises quand le niveau de variabilité amène le mouvement au-delà d'une fenêtre permettant une modulation en temps réel efficace.

Caractéristiques des corrections discrètes observées lors de l'acquisition : groupe vision-normale/petite-cible

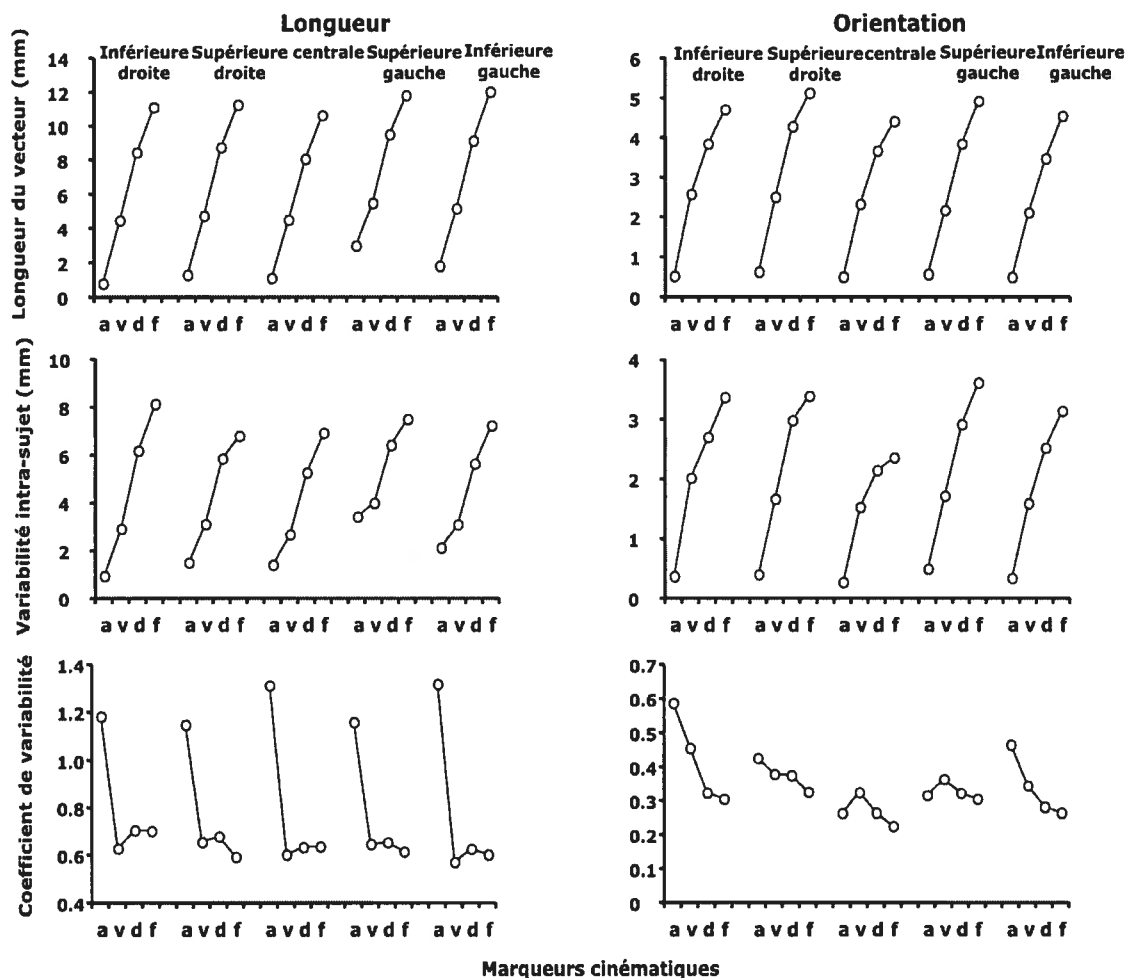
Ici, nous avons voulu évaluer si les impulsions de correction avaient les mêmes caractéristiques que l'impulsion initiale de mouvement. Pour cela, nous avons évalué la durée de cette impulsion corrective ainsi que l'occurrence spatiale et temporelle pour l'ensemble des marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération, position terminale). Nous avons aussi analysé la variabilité intra-sujet à chaque marqueur cinématique ainsi que les coefficients de variabilité. Le temps de mouvement fut soumis à une ANOVA contrastant 5 positions de cible. Les autres variables dépendantes ont été soumises à une ANOVA contrastant 5 positions de cible x 4 marqueurs cinématiques avec des mesures répétées pour ces deux facteurs.

Temps de mouvement. L'ANOVA n'a révélé aucune différence dans la durée de l'impulsion de correction selon la position de cible,  $F < 1$ . Les temps de mouvement moyens étaient respectivement de 198 ms (cible inférieure droite), 200 ms (cible supérieure droite), 205 ms (cible centrale), 213 ms (cible inférieure gauche) et 221 ms (cible supérieure gauche).

Occurrence spatiale et variabilité intra-sujet aux marqueurs cinématiques. Les ANOVAs calculées sur l'occurrence spatiale et la variabilité intra-sujet à chaque

marqueur cinématique, tant sur l'étendue que l'orientation des impulsions de correction, ont révélé les résultats suivants. On observa un effet principal du marqueur cinématique,  $F(3,96) = 222.36, 40.19, 68.87, \text{ et } 77.38$ , respectivement. Ces effets principaux montraient que les valeurs des composantes en étendue et en orientation des impulsions de correction augmentaient significativement d'un marqueur cinématique à l'autre. La variabilité intra-sujet en étendue et en direction augmentait également d'un marqueur à l'autre (effets principaux illustrés sur les quatre cadrans supérieurs de la figure 7).

Figure 7: Occurrence spatiale, variabilité et coefficient de variabilité sur les composantes étendue et orientation du mouvement.



Coefficients de variabilité en étendue et orientation. Les ANOVAs calculées sur le CEV et sur le COV (cadrans inférieurs de la figure 7) ont révélé un effet principal significatif du marqueur cinématique, respectivement,  $F(3, 96) = 89.98$  et  $3.65$ . L'analyse post hoc montra des CEV significativement plus élevés à l'occurrence du pic d'accélération (1.23) comparativement aux trois autres marqueurs qui n'étaient pas statistiquement différents (moyenne de 0.64). Les résultats concernant le COV montraient qu'il diminuait légèrement mais significativement d'un marqueur cinématique à l'autre, et ce jusqu'en fin de mouvement (respectivement 0.41, 0.38, 0.32, et 0.29).

Résumé des résultats concernant les impulsions de corrections. Les impulsions de correction observées pour le groupe vision-normale/petite-cible ne différaient pas en fonction de la position de cible. De plus, ces impulsions de correction étaient largement identiques aux premières impulsions de mouvement préalablement décrites mais ceci à deux exceptions près. D'abord la variabilité intra-sujet ne diminuait pas significativement entre le pic de décélération et la fin du mouvement tel qu'observé pour les premières impulsions de mouvement. Ceci était probablement dû à la petite distance qu'il restait à parcourir entre la fin de l'impulsion initiale et la position de cible. Deuxièmement, les valeurs des CEV et COV étaient beaucoup plus élevées que celles obtenues pour les impulsions initiales. Ceci résultait de l'amorce des impulsions de correction de positions différentes par rapport à la cible.

### Corrections directionnelles efficaces sur la composante orientation du mouvement

Dans une section précédente, nous avons montré qu'une bonne partie des essais avait une correction directionnelle de la première impulsion. Ici, nous avons voulu déterminer la proportion de correction s'effectuant entre le pic d'accélération et le pic de vitesse, entre le pic de vitesse et le pic de décélération puis entre le pic de décélération et la fin du mouvement. Cette approche a été préférée à une analyse de ces corrections axée sur un critère temporel puisque des temps de mouvement différents avaient été observés entre les petites et les grosses cibles des groupes vision normale. Pour la phase d'acquisition, nous avons soumis les données à une ANOVA contrastant 2 conditions visuelles x 2 tailles de cible x 5 positions de cible x 3 intervalles spatiaux (entre le pic d'accélération et le pic de vitesse, entre le pic de vitesse et le pic de décélération puis entre le pic de décélération et la fin du mouvement). En transfert, les données furent soumises à une ANOVA contrastant 2 conditions visuelles x 2 tailles de cible x 3 intervalles spatiaux.

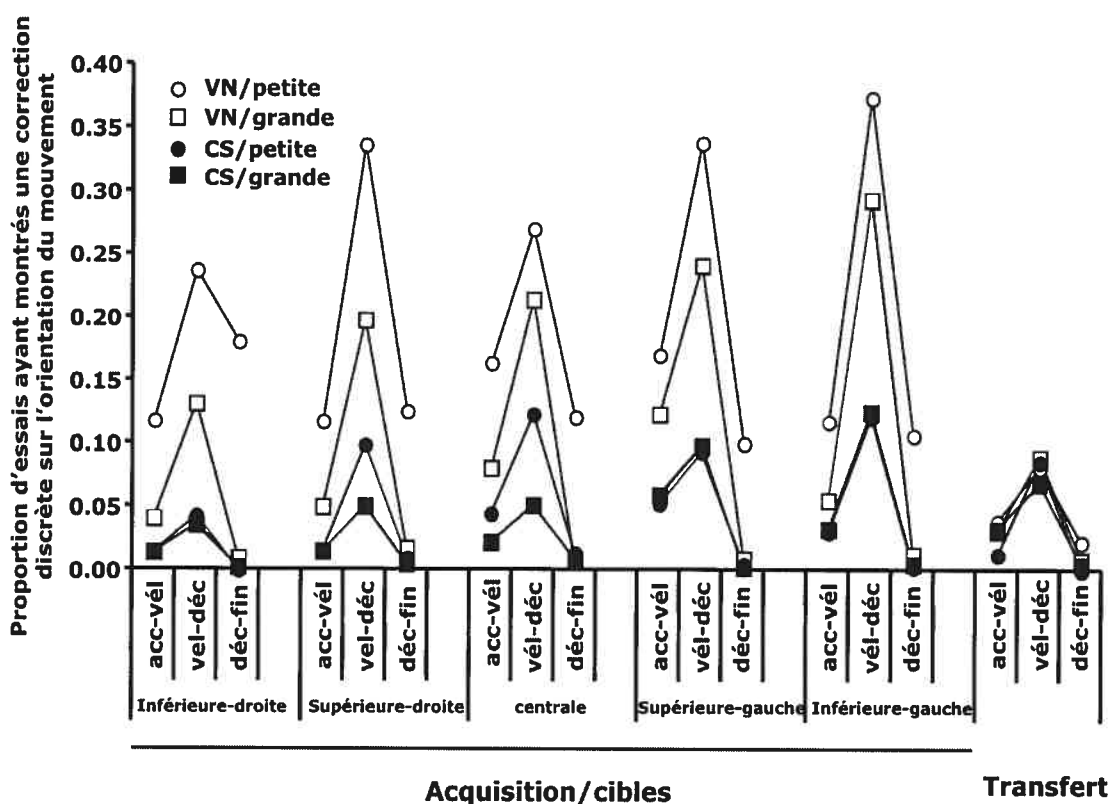
Pour la phase d'acquisition, l'ANOVA a révélé des interactions significatives, condition visuelle x intervalle,  $F(2, 70) = 4.5$ , position de cible x intervalle,  $F(8, 280) = 6.45$ , condition visuelle x taille de cible,  $F(1, 35) = 6.08$ . Ces résultats sont illustrés à la figure 8 (partie gauche de la figure).

La décomposition de l'interaction position de cible x intervalle révèle que la proportion de correction était significativement plus élevée entre le pic de vitesse et le pic de décélération comparativement aux deux autres intervalles. Pour ces deux derniers intervalles, aucune différence significative ne fut notée à l'exception des résultats



concernant la cible supérieure gauche. Pour cette position de cible, il y avait significativement plus de corrections entre le pic d'accélération et le pic de vitesse comparativement aux proportions observées entre le pic de décélération et la fin de la première impulsion.

Figure 8 : Proportion des essais ayant montré une correction discrète à trois moments cinématiques différents.



L'interaction condition visuelle x taille de cible montra une proportion significativement plus grande d'essais corrigés en vision normale comparativement à la condition cible-seule. Ceci était vrai tant pour les mouvements dirigés vers les petites cibles (19.1% vs. 4.4%) que vers les grosses cibles (9.9% vs. 3.5%), avec cependant une différence significativement plus grande pour les groupes confrontés aux petites cibles.

Finalement, l'interaction condition visuelle x intervalle a montré une proportion significativement plus grande d'essais comportant une correction pour la condition vision normale comparativement à la condition cible-seule et ceci indépendamment de l'intervalle. Cette interaction fut causée par la plus grande proportion de corrections observée entre le pic de vitesse et le pic de décélération en comparaison aux deux autres intervalles.

En transfert (partie droite de la figure 8), l'ANOVA a montré uniquement un effet principal d'intervalle. Celui-ci montrait plus de corrections entre le pic de vitesse et le pic de décélération (8.1%) que pour les deux autres intervalles (1.5% en moyenne). Le résultat le plus marquant de la phase de transfert est l'absence de différence relativement à la condition visuelle et la ressemblance avec les résultats obtenus en acquisition en ce qui concerne les groupes cible-seule.

Résumé concernant les corrections directionnelles. Des changements d'orientation du vecteur de mouvement étaient plus fréquemment observés en présence d'afférences visuelles dynamiques. Ceci suggère qu'une portion de ces corrections était basée sur le traitement de cette source d'information afférente. De plus, la plus grande proportion des corrections observées l'était entre l'occurrence du pic de vitesse et celle du pic de décélération (en moyenne entre 60 mm et 170 mm du centre de la cible). Ce dernier résultat montre donc que les déviations du vecteur de référence sont détectées et corrigées bien avant que d'éventuelles corrections sur la composante étendue du mouvement ne soient observées. Ce qui supporte les résultats obtenus par Messier et Kalaska (1999) obtenus en condition cible-seule.

## Discussion

L'objectif principal de la présente expérience était de déterminer si nous observerions une modulation de la première impulsion de mouvement pour une tâche de pointage contrainte de manière spatiale, tel que cela avait été montré dans plusieurs études utilisant des tâches contraintes de manière temporelle. Dans notre tâche contrainte de manière spatiale, les participants avaient toutefois la possibilité de produire des corrections discrètes. Le deuxième objectif de l'étude était de déterminer s'il existait des différences entre les premières impulsions des mouvements corrigés et non-corrigés. Finalement, nous avons évalué les caractéristiques des impulsions de corrections des mouvements corrigés.

### Modulation de la première impulsion lors d'une tâche contrainte de manière spatiale

En présence d'une tâche contrainte de manière spatiale, le premier aspect à considérer est de savoir si les mouvements se sont terminés ou non sur la cible. Pour les groupes vision-normale, les participants ont terminé leurs mouvements sur la cible pour plus de 90% des essais comparativement à une proportion de 50% (grosses cibles) et 5% (petites cibles) pour les groupes cible-seule. La haute précision des mouvements obtenue pour les groupes vision-normale résultait principalement de la modulation de la première impulsion mais aussi d'une impulsion de correction pour environ la moitié des mouvements dirigés vers de petites cibles. Ce résultat montre que ces participants n'adoptaient pas de manière systématique un mode de contrôle en temps réel ou un mode de contrôle à correction discrète. Au contraire, ces deux types de correction du

mouvement semblent être complémentaires et peuvent être utilisés lors d'un même essai. La coexistence de ces deux types de correction invalide donc le modèle proposé par Meyer et collaborateurs (1988) qui proposait une imperméabilité de la première impulsion de mouvement à toute modulation.

La planification du mouvement est un processus imprécis

Puisque les informations visuelles statiques et la CR étaient identiques pour les deux conditions visuelles utilisées, les différents groupes avaient accès au même type d'information pour planifier leurs mouvements. La faible proportion de cibles atteintes observée pour les groupes cible-seule indique que la planification seule n'est pas assez précise pour assurer la précision d'un mouvement, et ceci même pour des mouvements dirigés vers de grosses cibles (voir figure 2). Du moins, ceci est le cas lorsque plusieurs cibles sont utilisées. Une telle imprécision de la planification sous-entend alors la nécessité de recourir à des mécanismes de contrôle en temps réel efficaces et rapides. À cet égard, la faible proportion d'atteinte de cible obtenue tard en acquisition dans la condition cible-seule indique que de tels processus de contrôle nécessiteraient une pratique extensive si les afférences proprioceptives étaient la source d'information sensorielle disponible (voir figure 3 et 5). Cependant, il a été montré lors d'une tâche contrainte de manière temporelle que même 2000 essais de pratique dans une condition cible-seule ne permettaient pas d'atteindre les niveaux de performance obtenus lors d'une condition vision-normale (Proteau, Marteniuk, Girouard, & Dugas, 1987).

### Contrôle en temps réel : modulation du mouvement et corrections discrètes

Dans la condition vision-normale, les processus de contrôle en temps réel se manifestaient à la fois par des corrections discrètes et par une modulation de la première impulsion de mouvement. Bien que des corrections discrètes et des modulations de la première impulsion furent observées tant sur l'orientation que sur l'étendue, des différences importantes furent observées relativement à ces deux composantes du mouvement.

Sur la composante directionnelle du mouvement, la modulation de la première impulsion était significativement plus grande pour les mouvements dirigés vers les petites cibles que pour les mouvements dirigés vers les grandes cibles; ce qui ne fut pas observé sur l'étendue du mouvement. De plus, la modulation de la composante directionnelle du mouvement pouvait s'effectuer tôt (entre le pic d'accélération et le pic de vitesse) ou tard dans le mouvement (entre le pic de décélération et la fin du mouvement). Ces résultats ont des implications majeures.

Tel qu'il a été suggéré à de nombreuses reprises dans le passé, le contrôle de l'étendue et le contrôle de l'orientation d'un mouvement semblent mettre en jeu des processus différents (Gordon, Ghilardi, & Ghez, 1994I; Gordon, Ghilardi, & Ghez, 1994II; Gordon, Ghilardi, & Ghez, 1995; Ghez, Gordon, & Ghilardi, 1995). La variabilité de l'orientation une fois normalisée pour la longueur du mouvement est beaucoup moins élevée que celle observée sur la composante d'étendue. Une observation similaire a été faite dans une série d'études menées dans notre laboratoire (Lhuisset et Proteau, 2004; Proteau, 2005; Bédard et Proteau, 2005; Robin, Blandin,

Toussaint et Proteau., 2005). La raison pour laquelle la planification de l'orientation du mouvement est moins variable comparativement à celle de l'étendue reste à déterminer. Il est possible que cette différence résulte d'une meilleure définition de l'orientation que de l'étendue au niveau cortical (Georgopoulos, 1988) en plus de l'observation commune que la variabilité du mouvement est fonction de la décharge motrice qui dans la présente étude était moins importante sur la composante d'orientation que d'étendue du mouvement (Schmidt et al., 1979; Meyer et al., 1982).

La diminution progressive du COV lors de la progression du mouvement suggère un contrôle de l'orientation du mouvement sur un principe continu ou pseudo-continu. De plus, la disparition de cette modulation pour le groupe vision-normale/petite-cible lors du transfert suggère un processus utilisant les afférences visuelles dynamiques. Notons également que cette modulation ne s'est produite que pour les mouvements dirigés vers les petites cibles et ne résulte donc pas de facteurs mécaniques ou inhérents au système moteur. Il apparaît donc clairement que cette modulation est fonctionnelle et se produit afin d'amener l'effecteur dans un périmètre proche de la cible. Finalement, le caractère continu ou pseudo-continu du contrôle de l'orientation du mouvement pourrait expliquer pourquoi moins de corrections secondaires prirent place sur l'orientation que sur l'étendue du mouvement.

Sur la composante d'étendue de la tâche, la variabilité intra-sujet normalisée (CEV) était élevée tôt après l'amorce du mouvement (pic d'accélération) puis diminuait rapidement entre le pic d'accélération et le pic de vitesse. Une stabilisation était observée entre le pic de vitesse et le pic de décélération puis une diminution significative était de nouveau observée entre le pic de décélération et la fin du

mouvement. Ce comportement a été observé et reproduit dans des tâches contraintes de manière temporelle. Il a aussi été suggéré (Lhuisset et Proteau, 2004; Bédard et Proteau, 2005; Robin et al., 2005) que cette large réduction du CEV notée entre l'accélération et le pic de vitesse reflétait un processus particulier. En effet, Proteau et ses collaborateurs ont proposé que la planification serait basée à la fois sur des approximations concernant la position de la main et de la cible, certaines contraintes mécaniques et surtout sur l'état du système moteur (voies afférentes, pool de motoneurones, unités motrices etc...). À cause de toutes ces approximations, le système nerveux central aurait développé des mécanismes rapides pour mettre à jour la commande motrice après l'amorce du mouvement. Cette mise à jour réduirait la variabilité du mouvement puisqu'elle prendrait en compte l'état du système moteur plutôt que des approximations et que cet état est plus précisément déterminé sur la base d'information phasique plutôt que tonique. L'état stable du CEV observé entre le pic de vitesse et le pic de décélération refléterait quant à lui une prise d'information afin d'optimiser la réduction de la variabilité en fin de mouvement. Cette interprétation suggère que le contrôle de l'étendue est moins continu par nature que celui observé pour l'orientation ou encore que même une grande modulation de cette composante peut se produire tard dans le mouvement. Ces hypothèses sont actuellement en cours d'étude dans notre laboratoire.

Les corrections discrètes sont nécessaires pour des raisons de variabilité et non de biais systématiques lors de la planification du mouvement

Les essais comportant des corrections discrètes ne se distinguaient pas particulièrement de ceux qui n'en avaient pas. Ceci suggère que les deux types d'essais étaient issus d'un même plan moteur relativement peu stable. Par contre, les essais

montrant des corrections discrètes étaient les essais pour lesquels la modulation de la première impulsion était insuffisante pour assurer la précision finale du mouvement (voir figure 6). Par conséquent, il semble y avoir une limite d'efficacité dans ce mécanisme de modulation. Limite qui une fois atteinte génère un mécanisme responsable de la planification et du contrôle d'une impulsion de correction. Nous évaluons actuellement cette possibilité.

La seconde impulsion de correction observée pour à peu près la moitié des essais dirigés vers les petites cible en condition de vision normale était très efficace puisque 90% des mouvements se terminaient sur la cible. De plus, le CEV de ces impulsions secondaires diminuait rapidement au fur et à mesure de la progression du mouvement. Cette diminution du coefficient de variabilité était plus abrupte pour la composante étendue que pour celle d'orientation (COV) du mouvement qui elle était similaire à celle observée lors de la première impulsion. La diminution abrupte du CEV entre le pic d'accélération et le pic de vitesse et sa stabilisation subséquente suggère que les participants pouvaient réduire rapidement l'incertitude concernant la position du curseur par rapport à la cible afin de planifier une correction suffisamment fiable et précise pour permettre au mouvement de terminer sur la cible. La diminution graduelle du COV durant la seconde impulsion du mouvement suggère de nouveau un mode de contrôle continu ou pseudo continu sur cette dimension du mouvement.

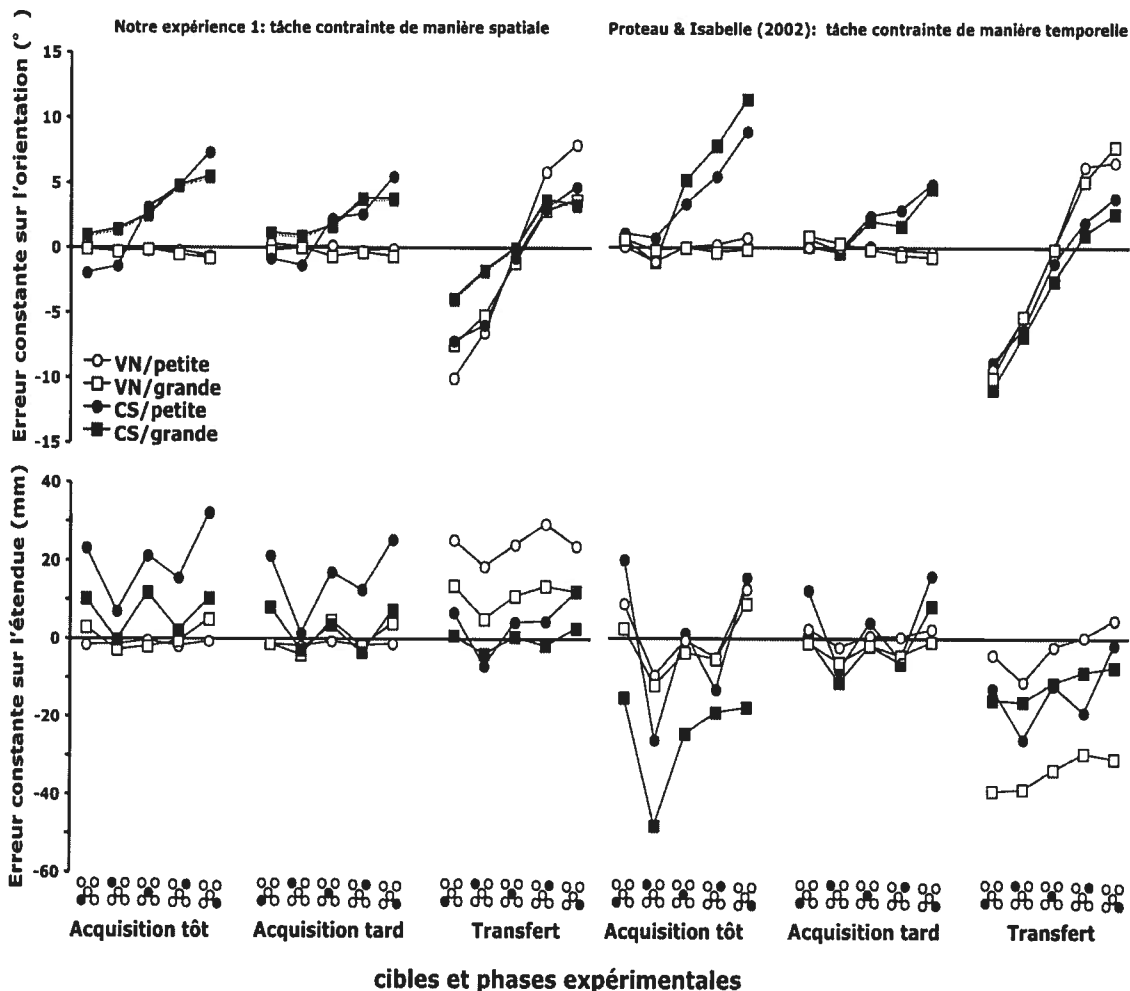
Différentes stratégies pour les tâches contraintes de manière temporelle ou spatiale

La procédure utilisée dans cette étude était similaire à celle utilisée par Proteau et Isabelle (2002) mais ceci à une exception près. Proteau et Isabelle (2002) utilisèrent une



tâche contrainte de manière temporelle et qui ne permettait pas aux participants de produire des corrections discrètes. De manière différente, la présente étude comportait une tâche contrainte de manière spatiale où les participants devaient avoir recours à des corrections discrètes pour atteindre la cible. Les résultats des erreurs constantes de l'orientation et de l'étendue du mouvement des deux études (tous les essais corrigés ou non-corrigés de la présente étude) sont illustrés à la figure 9 pour chaque position de cible. Tard dans l'acquisition, nous n'observons pas de différence majeure pour les biais en orientation ou en étendue et ceci quel que soit la condition visuelle utilisée (comparaison des deux études, figure 9). Par contre, une différence importante apparut lors de la phase de transfert. Dans l'étude où la tâche était contrainte de manière temporelle (Proteau et Isabelle, 2002), les résultats montrent que retirer les afférences visuelles dynamiques était plus préjudiciable sur la composante d'étendue pour les mouvements dirigés vers les grandes cibles comparativement aux mouvements dirigés vers de petites cibles; aucune différence ne fut notée sur la composante directionnelle.

**Figure 9** : Comparaison des données de précision spatiale entre les résultats obtenus dans cette expérience et ceux de Proteau & Isabelle (2002).



À l'opposé, la présente étude a montré que retirer les afférences visuelles avait un plus gros impact sur les mouvements dirigés vers les petites cibles et ceci tant sur la composante d'étendue que celle de l'orientation du mouvement. Proteau et Isabelle (2002) interprétèrent leurs résultats comme suit. Lorsque la production de corrections discrètes n'est pas permise, les participants réaliseraient que la modulation seule de l'impulsion du mouvement ne serait pas assez efficace pour terminer leur mouvement

sur la cible. Ils opteraient alors pour une stratégie reposant sur une élaboration plus précise de la planification. Alternativement, en présence de grandes cibles, les participants considéreraient que les mécanismes de modulation en temps réels sont suffisamment efficaces pour permettre au mouvement de terminer sur la cible. Ils adopteraient alors une stratégie de contrôle reposant sur la modulation du mouvement plutôt que sur une planification détaillée du mouvement.

Les résultats de la présente étude montrent une stratégie différente puisque les participants devaient terminer leur mouvement sur la cible. En effet, la planification du mouvement semble avoir été moins élaborée quand la modulation et la planification du mouvement ne peuvent à elles seules assurer la précision d'un mouvement et que potentiellement des sous-mouvements correctifs sont nécessaires. Ceci expliquerait pourquoi retirer la vision lors de la phase de transfert du groupe vision-normale a dans la présente étude eu un impact plus important pour les petites cibles comparativement aux grandes cibles. En effet, la source d'information nécessaire à l'élaboration de corrections discrètes n'étant plus disponible en transfert et les mécanismes de planification préalables étant peu élaborés pour les petites cibles expliquent l'impact important du retrait des afférences visuelles dynamiques sur la précision du mouvement. Pris ensemble, les résultats de ces deux études montrent que la relative dominance des afférences visuelles pour le contrôle du mouvement est relative au rapport nécessité/efficacité nécessaire pour assurer la précision spatiale. L'ensemble des données théoriques obtenues dans cette étude vont maintenant nous permettre d'étudier les mécanismes d'adaptation aux verres progressifs en ayant une meilleure connaissance des modes de contrôle impliqués dans des tâches contraintes de manière temporelle ou

spatiale. En effet, il était important de mettre à jour d'éventuelles différences de stratégie de contrôle du mouvement qui auraient pu influencer les processus adaptatifs que nous allons étudier dans les prochains chapitres.

## Bibliographie

- Bedard, 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(1), 75-85.
- Bedard, P., & Proteau, L. (2005). Movement planning of video and of manual aiming movements. *Spat Vis*, 18(3), 275-296.
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends Cogn Sci*, 4(11), 423-431.
- Desmurget, M., Jordan, M., Prablanc, C., & Jeannerod, M. (1997). Constrained and unconstrained movements involve different control strategies. *J Neurophysiol*, 77(3), 1644-1650.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol*, 47(6), 381-391.
- Georgopoulos, A. P. (1988). Neural integration of movement: role of motor cortex in reaching. *Faseb J*, 2(13), 2849-2857.
- Goodale, M. A., 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(6064), 748-750.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements. I. Independence of direction and extent variability. *Exp Brain Res*, 99(1), 97-111.

- Gordon, J., Ghilardi, M. F., Cooper, S. E., & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements. II. Systematic extent errors resulting from inertial anisotropy. *Exp Brain Res*, *99*(1), 112-130.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. I. Spatial errors. *J Neurophysiol*, *73*(1), 347-360.
- Ghez, C., Gordon, J., & Ghilardi, M. F. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. Effects of visual information on accuracy. *J Neurophysiol*, *73*(1), 361-372.
- Khan, M. A., Elliot, D., Coull, J., Chua, R., & Lyons, J. (2002). Optimal control strategies under different feedback schedules: kinematic evidence. *J Mot Behav*, *34*(1), 45-57.
- Khan, M. A., Lawrence, G., Fourkas, A., Franks, I. M., Elliott, D., & Pembroke, S. (2003). Online versus offline processing of visual feedback in the control of movement amplitude. *Acta Psychol (Amst)*, *113*(1), 83-97.
- Lhuisset, L., & Proteau, L. (2002). Developmental aspects of the control of manual aiming movements in aligned and non-aligned visual displays. *Exp Brain Res*, *146*(3), 293-306.
- Lhuisset, L., & Proteau, L. (2004). Movement planning and control of straight ahead and angled movements in adults and young children. *Can J Exp Psycho*, *58*, 245-258.
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Smith, J. E. (1988). Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements. *Psychol Rev*, *95*(3), 340-370.

- Meyer, D.E., Smith, J.E.K., & Wright, C.E. (1982). Models for the speed and accuracy of aimed movements. *Psychol Rev*, 89, 449-482.
- Prablanc, C., & Martin, O. (1992). Automatic control during hand reaching at undetected two-dimensional target displacements. *J Neurophysiol*, 67(2), 455-469.
- Proteau, L. (2005). Visual afferent information dominates other sources of afferent information during mixed practice of a video-aiming task. *Exp Brain Res*, 161(4), 441-456.
- 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(4), 367-384.
- Proteau, L., Marteniuk, R., 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.
- Robin, C., Blandin, Y., Toussaint, L., & Proteau, L. (2005). Specificity of learning in a video-aiming task: modifying the salience of dynamic visual cues. *J Mot Behav*, in press.
- Schmidt, R.A., Zelaznik H.N., Hawkins B, Frank, J.S., & Quinn, J.T. Jr. (1979) Motor-output variability, a theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psy Rev*, 47, 415- 451.
- Woodworth, R.S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psycho Rev*, 3 (Monograph Supplement) : 1-119.

## Chapitre 4

Contrôle du mouvement lors du port de verres à foyer progressif.



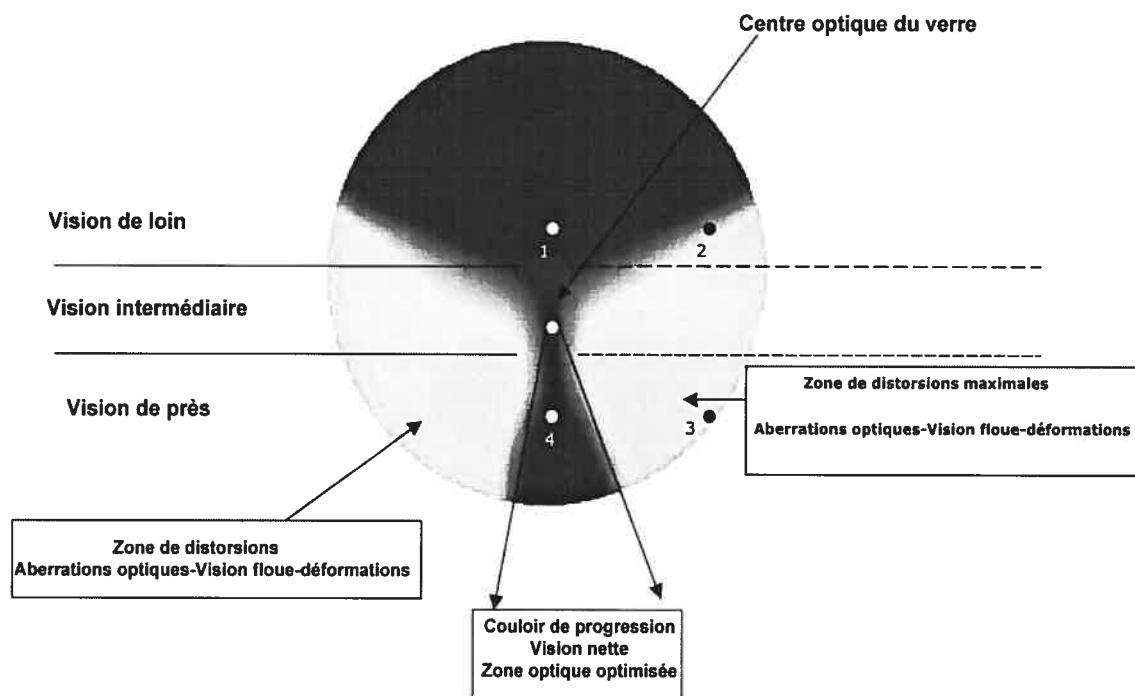
## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier les mécanismes d'adaptation et de contrôle du mouvement se mettant en place dans le cadre des distorsions complexes générées par des verres à foyer progressifs. Les verres progressifs sont des lentilles optiques permettant de voir net dans les trois zones de vision (loin, intermédiaire et près) et prescrites à des personnes atteintes de presbytie. La presbytie est une amétropie physiologique due à un vieillissement du cristallin et survenant entre 40 et 45 ans. À cet âge, le cristallin perd la capacité de déformation lui permettant de faire la mise au point et de voir net des objets situés à courte distance d'où la nécessité d'une addition optique. Pour assurer au patient une vision nette à différentes distances focales, on prescrit donc ces verres pourvus d'une addition progressive (couloir de progression); addition progressive qui va du centre (centre optique) au bord inférieur du verre (voir la figure 1). Ce couloir de progression permet la vision intermédiaire et la vision de près; la vision de loin étant assurée par la portion supérieure du verre.

Du fait de sa structure optique générant des distorsions complexes et non homogènes, le verre progressif a cependant des répercussions optiques et perceptives. Par exemple, le champ optique supérieur, qui assure une vision nette de loin, contient des distorsions (déformations spatiales) lorsque l'on regarde dans la portion périphérique du verre. Aussi, de part et d'autre du couloir de progression assurant la vision intermédiaire et la vision de près, on relève des distorsions et des aberrations optiques (zones de vision floue) majorées dans la portion inféro-latérale du verre. À ces distorsions et aberrations optiques, il faut aussi ajouter un effet prismatique résultant de

l'équilibrage de l'épaisseur des verres. Cet effet prismatique représentant les 2/3 de l'addition optique est présent sur l'ensemble du verre et déplace les images vers le haut. De plus, la base (courbure du verre) peut aussi avoir un impact perceptif. Selon sa valeur, la base d'un verre peut agrandir ou comprimer une image et donc générer une distorsion supplémentaire.

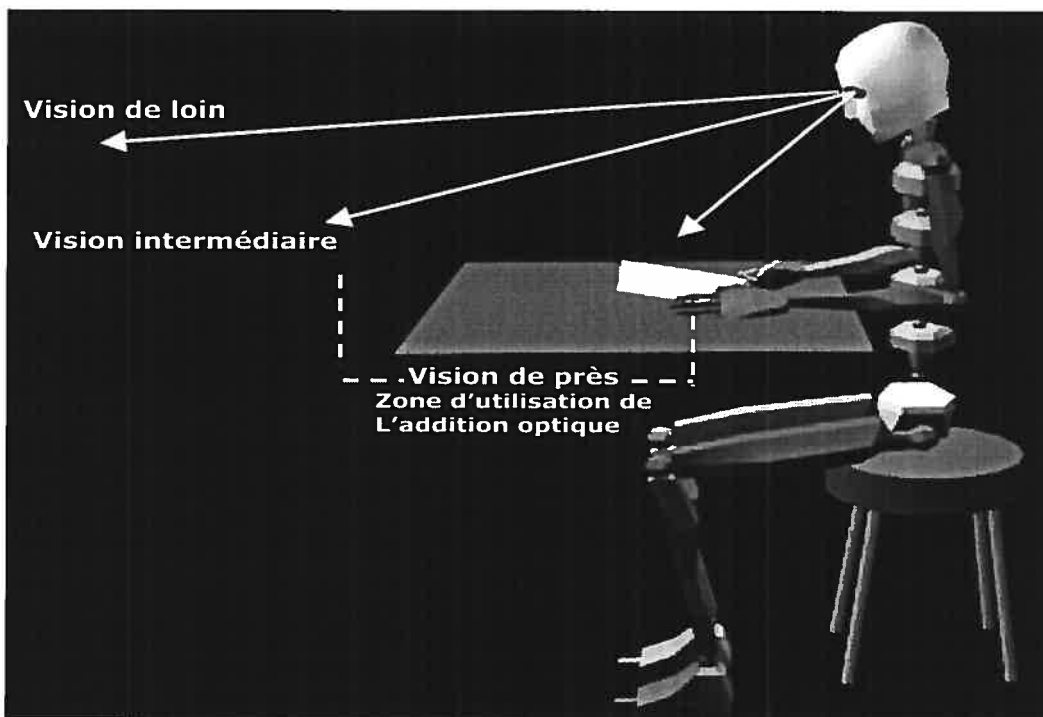
**Figure 1** : Représentation d'un verre progressif et des différentes zones de vision, de distorsions et d'aberrations optiques. Le centre optique, le couloir de progression ainsi que les positions des quatre cibles utilisées sont représentés



Au niveau visuel, la mise au point d'un objet avec ce type de verre dépend de l'orientation de la tête et du regard (figure 2). Comme certaines zones du verre sont liées à une distance focale précise (distance où un objet sera vu net à travers le verre), tout changement de la position de la tête et/ou du regard influencera la netteté de l'objet

regardé. De plus, si la position de la tête et/ou du regard font qu'un objet est localisé en dehors du couloir de progression il y aura un cumul d'aberration (vision floue) et de distorsion (déformation de l'espace) optiques.

Figure 2 : Représentation des trois zones de vision pouvant être affectées par le port de tête lorsque des verres progressifs sont portés.



À la lumière des données optiques concernant le verre progressif, il apparaît clairement que celui-ci génère un environnement perceptif complexe pouvant influencer sur les mécanismes de planification/contrôle du mouvement. Si l'on accepte la notion qu'un mouvement est programmé selon un vecteur et que les mécanismes précoces de cette planification sont liés aux positions spatiales de la cible à atteindre et de l'effecteur à l'amorce du mouvement, toute distorsion perceptive de ces indices spatiaux induira un conflit entre le mouvement produit et le mouvement perçu visuellement. Il est possible

que les distorsions induites par les verres progressifs génèrent de tels conflits. Ainsi, des adaptations pourraient être nécessaires et découleraient d'intégrations sensorimotrices permettant la mise en place de nouvelles corrélations résolvant le conflit entre la vision et la proprioception (Pine, Krakauer, Gordon, & Ghez, 1996; Krakauer, Ghilardi, Mentis, Barnes, Veystsmann, Eidelberg, & Ghez, 2004). Un certain nombre d'auteurs ont déjà montré que le système visuo-moteur pouvait s'adapter à différents types de distorsions perceptives pour des conditions perturbant les informations visuelles statiques ou dynamiques ou encore les informations proprioceptives (Krakauer, Ghilardi & Ghez, 1999; Krakauer, Pine, Ghilardi, & Ghez, 2000; Karniel & Mussa-Ivaldi, 2002; Krakauer, Ghez, & Ghilardi, 2005; Redding, Rossetti, & Wallace, 2005).

L'induction d'une distorsion optique implique la perturbation des éléments spatiaux nécessaires aux stades précoces de la programmation (position de la cible et position de l'effecteur sur la base de départ). Préalablement aux études d'adaptation aux verres progressifs, il était nécessaire de comprendre les mécanismes de contrôle impliqués dans une tâche qui exigeait de terminer le mouvement sur une cible (contrainte spatiale); ce que nous avons fait dans l'expérience 1. Les résultats de l'expérience 1 et ceux de Proteau et Isabelle (2002) ont montré qu'en fonction de l'indice de difficulté imposé, il existait des stratégies de contrôle du mouvement différentes entre les tâches contraintes de manière temporelle ou spatiale. Cependant, les modes de contrôle impliqués lors de ces deux types de tâches étaient assez similaires. La modulation de la première impulsion de mouvement observée dans des études contraintes de manière temporelle (Lhuisset & Proteau, 2002; Sarlegna, Blouin, Bresciani, Bourdin, Vercher, & Gauthier, 2003; Sarlegna, Blouin, Vercher, Bresciani,

Bourdin, & Gauthier, 2004; Bédard & Proteau, 2004) était toujours présente lors d'une tâche spatialement contrainte. Cependant, l'expérience 1 a mis à jour une limite dans ce processus de modulation. En effet, il semblerait qu'au-delà d'une certaine fenêtre de variabilité, la modulation en temps réel de la première impulsion devient insuffisante pour assurer l'atteinte de la cible, ce qui requiert la production de corrections discrètes. La première expérience montre également que les corrections discrètes mises à jour résultaient d'une trop grande variabilité du mouvement et non de biais systématiques issus de la planification.

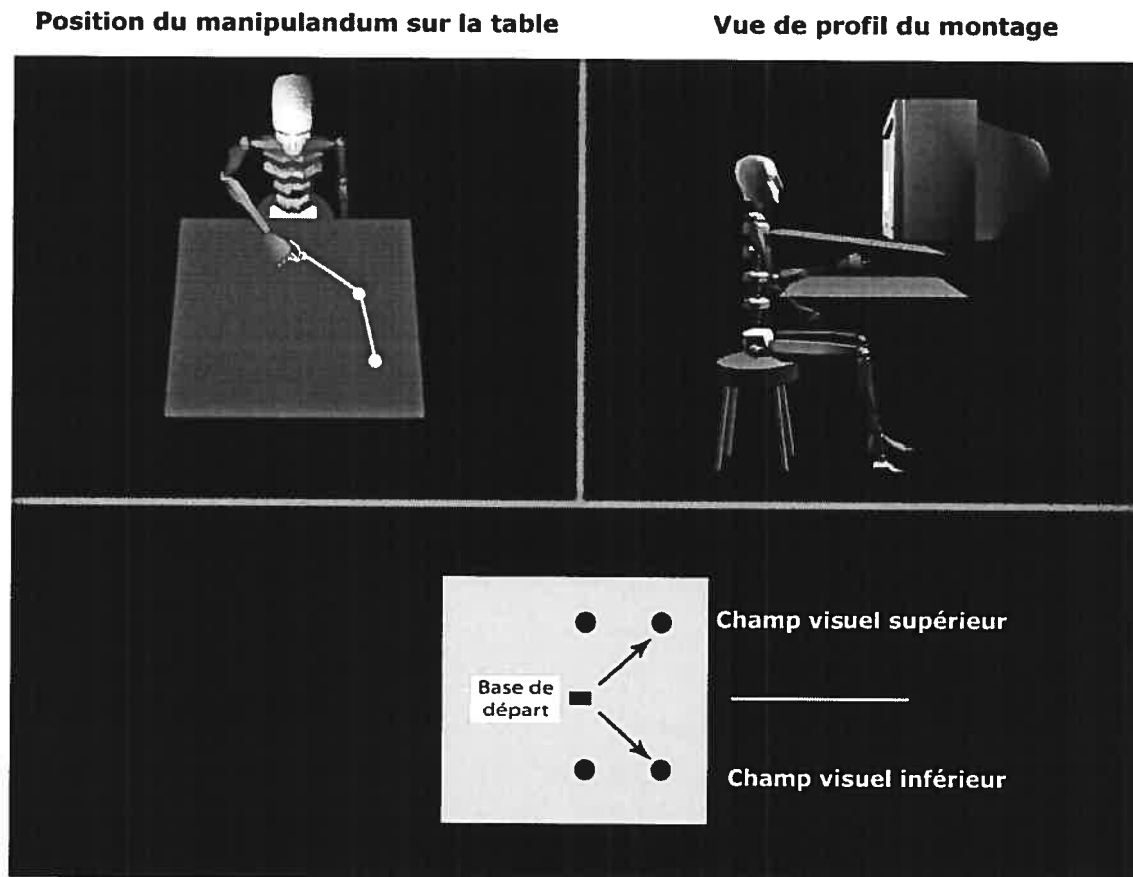
À notre connaissance, il n'existe pas d'étude ayant évalué l'impact de la présence de distorsions optiques multiples sur les mécanismes d'adaptation ou de contrôle du mouvement. En termes adaptatifs, une telle étude est importante pour évaluer si un modèle interne fiable peut être établi lorsque les perturbations visuelles induites sont variables d'un point de l'espace à un autre. À un niveau plus clinique, il est important de mieux comprendre les problèmes d'acclimatation observés chez les nouveaux porteurs de verres progressifs car plus de 90% des futurs presbytes sont de potentiels porteurs de verres progressifs. Les nouveaux porteurs ont généralement de la difficulté à effectuer des tâches familières lors du port de ces lunettes. Les plaintes enregistrées sont dans la majorité des cas d'ordre visuo-moteur. Les nouveaux porteurs décrivent une perception de distorsion de l'environnement en condition statique ou dynamique, des extensions ou contractions de l'espace et dans certains cas une sensation de tangage (Gresset et al., 2000). Il en résulte souvent un problème d'appréciation des distances et d'ajustement du geste. Il est cependant important de souligner que ces troubles ne sont pas systématiques et qu'il existe de nombreuses différences inter-individuelles.

Les résultats de ces études d'adaptation aux verres progressifs permettront également de répondre à des interrogations d'ordre plus théorique. En effet, dans les études d'adaptation prismatique le conflit vision-proprioception est évident du fait de distorsions optiques de l'ordre de 30 à 40 dioptries (Redding & Wallace, 2004; Redding et al., 2005). Ceci peut expliquer la mise en place relativement facile et rapide d'un modèle interne efficace. Cependant, que se passe-t-il dans le cadre de distorsions plus subtiles et multiples (telles que celles générées par les verres progressifs)? Est-ce que ces distorsions affectent la planification du mouvement? Cette plus grande variabilité créée au sein de l'espace a-t-elle des répercussions sur le mode de contrôle du mouvement (production corrections discrètes) ? Les expériences 2 et 3 ont été réalisées pour répondre à ces questions. L'expérience 2 impliquait une localisation des cibles en vision fovéale tandis que l'expérience 3 a été réalisée avec une localisation périphérique des cibles.

### Méthodologie

Une configuration expérimentale identique à celle de la première expérience a été utilisée à l'exception de quelques modifications (figure 3). La position des cibles et de la base de départ, le déroulement expérimental ainsi que les critères d'inclusion des groupes expérimentaux ont été changés. L'expérience 1 a révélé des modes de contrôle assez similaires entre les tâches contraintes de manière temporelle et spatiale. Nous avons donc choisi d'utiliser pour les expériences 2 et 3 une tâche de pointage contrainte de manière temporelle et ceci afin d'éviter la mise en place de compromis vitesse-précision différents en fonction des conditions expérimentales de l'étude.

**Figure 3** : Montage expérimental, position des cibles et de la base de départ pour les expériences 2 et 3.



### Critères d'inclusion et bilan optométrique

Pour éviter tout effet lié à l'âge et essayer d'évaluer l'effet brut des verres progressifs, les participants étaient âgés de 18 à 30 ans. Chaque participant prenait part à un bilan optométrique au sein de la clinique d'optométrie de l'Université de Montréal. Cette évaluation clinique permettait de détecter tout problème visuel, de vérifier que les critères d'inclusion optique étaient respectés et permettaient d'obtenir toutes les données d'optique physiologique permettant la prescription personnalisée de verres progressifs. Nos critères autorisaient une myopie maximale de -1.5 dioptries et une hypermétropie de

+1 dioptrie. Tout astigmatisme allant au-delà de 0.5 dioptrie ne permettait pas de prendre part aux expériences. En résumé, nos participants devaient avoir une vision parfaite ou une très faible amétropie.

#### Prescription des verres, choix des montures et ajustements

Suite au bilan optométrique, l'optométriste prescrivait des verres progressifs Varilux® Comfort® (Essilor) avec une courbure de +5.5 dioptries et une addition de +2.5 dioptries. La courbure de +5.5 dioptries correspondant aux critères conseillés par le fabricant afin d'obtenir une homogénéisation des distorsions par rapport aux critères d'amétropie utilisés. Un choix de monture était fait en fonction de la forme du visage de chaque participant. Le critère appliqué pour le choix des montures était que la distance entre le bord inférieur de la lunette et le centre de la pupille devait être de 22 mm. Après réception des lunettes et juste avant la première session expérimentale, un ajustement des lunettes au visage de chaque participant était fait. Cet ajustement servait à garder une homogénéisation des distorsions à travers les groupes. L'ajustement était tel que l'angle pantoscopique (angle résultant de l'inclinaison du verre par rapport au plan frontal) était fixé à  $12^{\circ}$  et que la distance œil-verre (vertex) était maintenue à 12.75 mm.

#### Position de la base de départ

Pour ces expériences d'adaptation, la position de la base de départ du stylet se situait au centre de la table. Ainsi, des mouvements vers le haut (champ visuel supérieur) et vers le bas (champ visuel inférieur) pouvaient être produits afin d'évaluer l'impact des différentes zones de distorsion des verres progressifs sur la planification et le contrôle du



mouvement (figure 3). Les participants voyaient l'écran à une distance de 50 cm, la base de départ à hauteur des yeux et parfaitement alignée à l'axe sagittal médian du participant.

### Position des cibles

Des mesures pilotes nous ont permis de déterminer des positions de cibles à l'intérieur des zones optiques d'intérêt. Nous avons défini quatre positions de cible; deux dans le champ visuel supérieur et deux dans le champ visuel inférieur. Les deux cibles latérales (supérieure et inférieure) se trouvaient respectivement à  $21.6^{\circ}$  dans le champ visuel (l'écran était vu à 50 cm et les coordonnées cartésiennes par rapport à la base de départ étaient 140 mm sur l'axe sagittal et sur l'axe latéral) tandis que les deux cibles axiales se trouvaient à  $15.6^{\circ}$  dans le champ visuel (l'écran était vu à 50 cm et les coordonnées cartésiennes par rapport à la base de départ étaient 140 mm sur l'axe sagittal et 0 mm sur l'axe latéral). Pour l'espace de travail utilisé, le gradient de distorsion imposé par les verres progressifs était croissant du centre vers la périphérie et de haut en bas. Cette disposition des cibles permettait d'évaluer les différents processus d'adaptation et de contrôle selon les différents degrés de distorsion générés par ce type de verre. Les cibles avaient une taille de 10 mm de diamètre.

### Groupes expérimentaux

Les participants étaient des étudiants de divers départements de l'Université de Montréal et ont été rémunérés 60\$ pour leur participation. L'ensemble des participants a pris part aux deux expériences. Pour éviter tout effet d'habitude, les deux expériences

étaient séparées d'une semaine et les participants étaient exposés à une condition perceptive différente lors des deux sessions expérimentales. L'ensemble des participants a été réparti en quatre groupes dont les noms correspondaient à la condition perceptive à laquelle ils étaient exposés lors de la phase d'acquisition.

#### Groupe vision-normale/distorsion

Ce groupe servait à évaluer l'impact des verres progressifs lorsqu'un contrôle du mouvement via les afférences visuelles est possible. Les participants de ce groupe portaient les verres progressifs durant les phases d'acquisition et de recouvrement et avaient la vision dynamique de leur mouvement. Les verres progressifs n'étaient pas portés durant les post-tests.

#### Groupe cible-seule/distorsion

Ce groupe servait à évaluer l'impact des verres progressifs lorsqu'un contrôle du mouvement via les afférences visuelles n'était pas possible. Les participants de ce groupe portaient les verres progressifs durant les phases d'acquisition et de recouvrement, mais n'avaient pas la vision dynamique de leur mouvement. Les verres progressifs n'étaient pas portés durant les post-tests.

#### Groupe plano

Ce groupe contrôle permettrait d'exclure ou d'inclure un impact de la base (ou courbure) du verre progressif. Les participants de ce groupe portaient des verres neutres de courbure +5.5 dioptries (identique à la courbure des verres progressifs utilisés) durant

les phases d'acquisition et de recouvrement. Ces verres plano n'étaient pas portés durant les post-tests.

### Groupe vision-normale

Ce groupe était le groupe contrôle direct du groupe vision-normale/distorsion. Il permettrait de déterminer l'impact des verres progressifs sur les différentes variables étudiées. Les verres progressifs n'étaient pas portés durant l'acquisition et le recouvrement. Les participants de ce groupe portaient des verres progressifs durant les post-tests uniquement.

### Décours expérimental

Les expériences 2 et 3 étaient composées de quatre phases expérimentales précédées d'une phase de familiarisation qui ne sera pas prise en compte dans les différentes analyses. Une phase d'acquisition (200 essais) permettait de comparer les performances obtenues pour les quatre groupes expérimentaux. Lors de la phase d'acquisition, la connaissance du résultat (CR) était donnée à chaque groupe. La phase d'acquisition était suivie d'un post-test (40 essais sans CR) en vision normale afin d'évaluer les effets de l'ajout ou du retrait des lunettes au sein des groupes ayant pratiqué en présence de vision dynamique. Ce premier post-test était suivi d'une phase de recouvrement (52 essais avec CR) servant à rétablir le niveau de performance obtenu en fin d'acquisition. Les participants réalisaient la phase de recouvrement dans les mêmes conditions que la phase d'acquisition. Finalement, les participants prenaient part à un dernier post-test (40 essais sans CR) en condition cible-seule afin d'évaluer les

effets du retrait des verres progressifs pour le groupe n'ayant pas eu la vision dynamique du mouvement lors de la phase d'acquisition. Les post-tests étaient contrebalancés d'un participant à un autre. Le tableau 1 résume l'ensemble des conditions expérimentales ainsi que la connaissance du résultat qui était donnée aux participants.

**Tableau 1** : phases expérimentales en fonction des conditions perceptives et de la connaissance du résultat (CR).

	acquisition	Post-test/vision	Recouvrement	Post-test/cible-seule
Vision-normale/distorsion	Vision-normale distorsions + CR	Vision-normale	Vision-normale distorsion + CR	Cible-seule
Cible-seule/distorsion	Cible-seule distorsions + CR	Vision-normale	Cible-seule distorsions + CR	Cible-seule
Plano	Plano CR	Vision-normale	Plano CR	Cible-seule
Vision-normale	Vision-normale CR	Vision-normale distorsions	Vision-normale CR	Cible-seule distorsions

**Légende :**

**Vision-normale** : la base de départ, la cible et le mouvement de l'effecteur sont vus par le participant.

**Cible-seule** : seules la base de départ et la cible sont vus du participant.

**CR** : connaissance du résultat illustrée graphiquement.

**Distorsions** : signifie que le participant porte des verres progressifs.

**Plano** : signifie que le participant porte des verres neutres à base +5.5 dioptries.

## Expérience 2

### Résultats

Les analyses préliminaires ont révélé que seulement 4% des essais présentaient des corrections discrètes et ceci quel que soit le groupe expérimental considéré. Ces essais corrigés n'ont pas été pris en compte dans les analyses qui suivent. L'ensemble des résultats de l'expérience 2 a été divisé en trois sous-sections afin d'évaluer l'impact du port des verres progressifs sur le contrôle et/ou la planification et l'adaptation lors

d'un mouvement de pointage vidéo. Dans un souci de clarté, nous avons défini au début de chaque sous-section les variables d'intérêts, l'objectif de leur utilisation ainsi que les analyses statistiques utilisées.

#### Acquisition tôt/acquisition tard/recouvrement

Dans cette section, l'objectif premier était de déterminer la précision spatiale des mouvements en fonction des conditions expérimentales auxquelles les différents groupes étaient confrontés. Nous avons également voulu déterminer si la phase de recouvrement suivant le premier post-test permettait aux participants d'atteindre le même niveau de performance qu'en fin d'acquisition. Pour chaque groupe, nous avons donc calculé le biais (erreur constante sagittale et latérale) ainsi que la variabilité (erreur variable sagittale et latérale) des mouvements lors du premier et du dernier bloc de la phase d'acquisition ainsi que pour le dernier bloc de la phase de recouvrement. Ces données ont été soumises individuellement à une ANOVA contrastant 4 conditions expérimentales (vision-normale/distorsion, cible-seule/distorsion, plano, vision-normale) x 3 phases expérimentales (acquisition tôt, acquisition tard, recouvrement) x 4 positions de cible (supérieure-axiale, supérieure-droite, inférieure-droite, inférieure-axiale) en utilisant des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

L'ANOVA a révélé sur les composantes latérale et sagittale du mouvement que les trois groupes ayant bénéficié de la vision avaient une performance similaire et étaient significativement plus précis (respectivement  $\underline{F}(3,35) = 9.3$  et  $\underline{F}(3,35) = 4.58$ ), et moins variables (respectivement  $\underline{F}(3,35) = 88.6$  et  $\underline{F}(3,35) = 731.7$ ) comparativement au groupe cible-seule/distorsion.

L'ANOVA calculée sur l'erreur constante latérale montra un effet principal de position de cible,  $F(3, 105) = 16.4$ . Cet effet montrait que les mouvements dirigés vers les cibles supérieures avaient tendance à finir à gauche des cibles (moyenne de -1.4 mm) tandis que les mouvements dirigés vers les cibles inférieures avaient tendance à finir à droite des cibles (moyenne de 2.5 mm). L'ANOVA calculée sur l'erreur variable latérale révéla un effet principal de position de cible,  $F(3, 105) = 85.92$ , indiquant que les mouvements dirigés vers la cible supérieure-droite étaient significativement plus variables (6.0 mm) que ceux dirigés vers la cible inférieure-droite (4.8 mm); la dispersion spatiale observée pour ces deux cibles était significativement plus grande que celle obtenue pour les deux cibles axiales qui ne se différenciaient pas l'une de l'autre (moyenne de 2.9 mm). L'ANOVA calculée sur l'erreur constante et l'erreur variable sagittale ne révéla aucune différence significative entre les trois groupes vision ( $p > .15$ ).

Ces résultats de précision spatiale ne montrent aucune différence entre le groupe vision-normale/distorsion et les deux groupes contrôles (plano et vision-normale). Cette performance identique des groupes ayant bénéficié de la vision dynamique du mouvement pourrait résulter de l'implication de mécanismes de contrôle en temps réel très efficaces. Ces potentielles modulations du mouvement pourraient permettre de compenser l'impact des distorsions générées par les verres progressifs, ce qui expliquerait la bonne précision spatiale enregistrée au sein de ces trois groupes dont notamment pour le groupe vision-normale/distorsion.

Afin d'évaluer cette hypothèse, nous avons calculé où (longueur et orientation du vecteur de mouvement) et quand se manifestaient les pics d'accélération, de vitesse, de

décélération ainsi que la fin des mouvements. Nous avons également calculé les coefficients de variabilité à chacun de ces marqueurs cinématiques. Ces données spatiales et temporelles ainsi que les coefficients de variabilité ont chacun été soumis à une ANOVA. Cette ANOVA contrastait 3 conditions expérimentales (vision-normale/distorsion, plano, vision-normale) x 3 phases expérimentales (acquisition tôt, acquisition tard, recouvrement) x 4 positions de cible (supérieure-axiale, supérieure-latérale, inférieure-latérale, inférieure-axiale) x 4 marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération, fin du mouvement) en utilisant des mesures répétées pour les trois derniers facteurs.

Concernant la longueur des vecteurs de mouvement, l'ANOVA a révélé une interaction significative pic cinématique x position de cible,  $F(9, 234) = 993.4$ . La décomposition de cette interaction a montré que l'occurrence spatiale des pics cinématiques était fonction de la position de cible et de l'inertie du mouvement. En effet, plus les forces nécessaires pour rompre l'inertie dans une direction donnée sont grandes et plus l'accélération initiale à appliquer devra être grande. Ceci se répercute au niveau cinématique par une occurrence spatio-temporelle plus tardive des différents marqueurs cinématiques. Plus spécifiquement, du pic d'accélération au pic de décélération, la longueur des vecteurs de mouvement était significativement plus grande pour la cible inférieure-droite (respectivement 14.8 mm, 94.0 mm et 179.4 mm) que pour la cible supérieure-droite (respectivement 8.1 mm, 84.7 mm et 175.3 mm) dont les valeurs étaient significativement plus élevées que celles des deux cibles axiales (moyenne respective de 6.9 mm, 63.1 mm et 125.6 mm) qui ne se différenciaient pas l'une de l'autre pour la variable d'intérêt étudiée. Pour les positions terminales, la longueur des

vecteurs de mouvement était fonction de la position des cibles; les vecteurs de mouvement étaient identiques pour les cibles latérales (moyenne de 196.0 mm pour un vecteur de référence de 197.8 mm) mais significativement plus longs comparativement aux valeurs des cibles axiales qui ne se différençaient pas l'une de l'autre (moyenne de 137.4 mm pour un vecteur de référence de 140 mm).

L'ANOVA calculée sur l'orientation du vecteur de mouvement révéla une interaction significative marqueur cinématique x position de cible,  $F(9, 225) = 51.1$ . Cette interaction était principalement due au fait que du pic d'accélération au pic de décélération, les vecteurs de mouvement de la cible supérieure-axiale (respectivement  $93.4^{\circ}$ ,  $90.7^{\circ}$  et  $93.4^{\circ}$ ) étaient orientés significativement plus à gauche de celle-ci comparativement à ceux enregistrés pour la cible inférieure axiale (respectivement  $87.8^{\circ}$ ,  $88.9^{\circ}$  et  $82.1^{\circ}$ ). Aucune différence significative n'a été obtenue en fin de mouvement pour ces deux positions de cible relativement à la variable étudiée. Un comportement similaire a été enregistré pour les cibles latérales mais uniquement au pic de vitesse où le vecteur de mouvement était orienté significativement plus à gauche de la cible latérale-supérieure ( $47.7^{\circ}$ ) comparativement à la cible latérale-inférieure ( $44.7^{\circ}$ ). Aucune autre différence significative n'a été obtenue entre les deux cibles latérales concernant l'orientation du vecteur de mouvement.

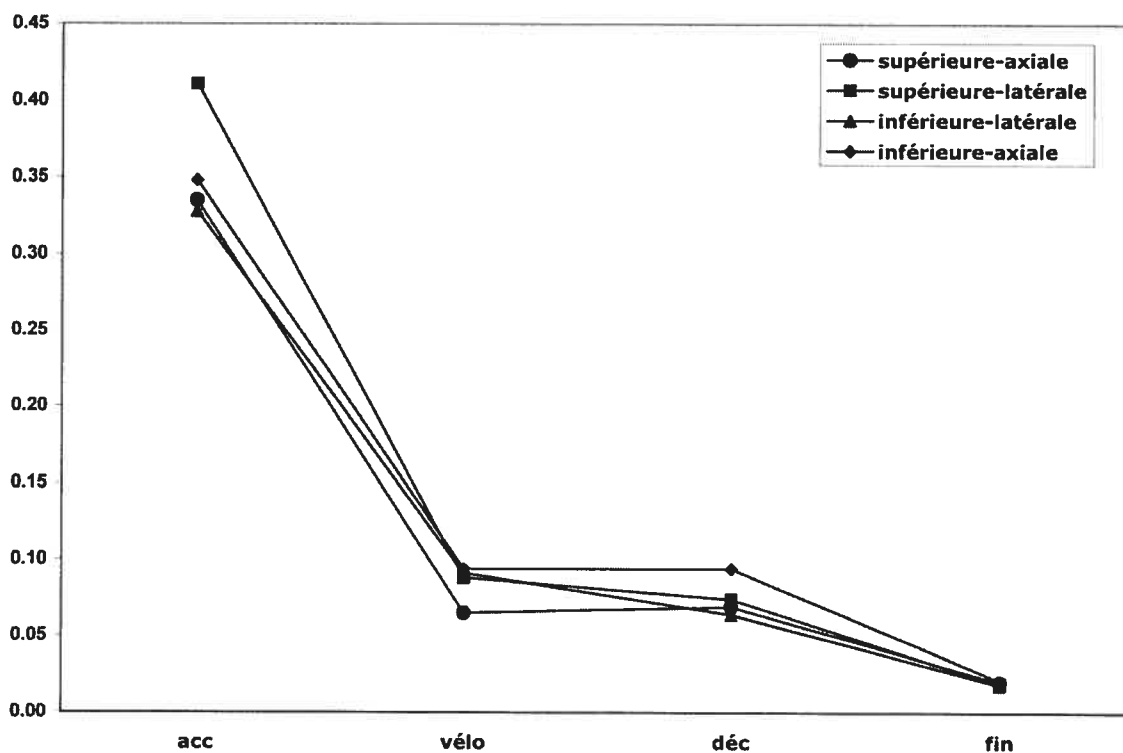
L'ANOVA calculée sur les données temporelles révéla une interaction significative marqueur cinématique x position de cible,  $F(9, 234) = 20.5$ . La décomposition de cette interaction illustrée à la figure 5 révéla un impact de la position de cible et de l'inertie du mouvement sur l'occurrence des différents marqueurs cinématiques. En effet, du pic d'accélération à la fin du mouvement, l'occurrence



temporelle des marqueurs cinématiques était significativement plus tardive pour la cible inférieure-droite (respectivement 105.5 ms, 207.2 ms, 324.3 ms et 463.1 ms) que pour la cible supérieure-droite (respectivement 97.4 ms, 189.2 ms, 305.3 et 450.7 ms) dont les valeurs étaient significativement plus élevées que celles des deux cibles axiales (moyenne respective de 91.7 ms, 184.8 ms, 295.5 et 431.65 ms) qui ne se différenciaient pas l'une de l'autre pour la variable d'intérêt étudiée.

Les résultats de l'ANOVA calculée sur le coefficient de variabilité montrèrent une interaction significative marqueur cinématique x position de cible,  $F(9, 234) = 4.2$ , illustrée à la figure 4. La décomposition de cette interaction montra une diminution générale du coefficient de variabilité, diminution qui était statistiquement significative entre le pic d'accélération et le pic de vitesse et entre le pic de décélération et la fin du mouvement. Au pic d'accélération, cette interaction montra également une variabilité plus élevée pour la cible supérieure-latérale (0.41) comparativement aux cibles supérieure-axiale et inférieure-latérale qui ne se différenciaient pas entre elles (moyenne de 0.34); aucune autre différence significative ne fut révélée entre la cible supérieure-latérale et la cible inférieure-axiale. Au pic de vitesse, la cible supérieure-axiale avait une variabilité significativement plus petite (0.07) que celle des trois autres cibles qui ne se différenciaient pas à ce marqueur (moyenne de 0.09). Pour la cible inférieure-latérale, les résultats montrèrent une diminution significative du coefficient de variabilité entre le pic de vitesse (0.09) et le pic de décélération (0.06). Aucune différence significative ne fut révélée entre les différentes cibles au pic de décélération et en fin de mouvement.

**Figure 4** : Coefficient de variabilité sur l'étendue aux différents marqueurs cinématiques pour les phases acquisition tôt-acquisition tard- recouvrement et selon les quatre positions de cible utilisées



Dans cette première section, les analyses menées n'ont révélé aucun impact des conditions expérimentales sur les différentes variables d'intérêt. Ces résultats suggèrent la possibilité d'une mise en place rapide d'adaptations visuo-motrices lorsque les afférences visuelles dynamiques sont disponibles. L'absence de différence entre le groupe vision-normale/distorsion et les groupes contrôles pourrait signifier qu'il existe peu de distinction entre les potentielles adaptations et les modulations mises en place au sein des groupes contrôle. Une façon de confirmer si des adaptations visuo-motrices ont réellement pris place lors de l'acquisition est d'évaluer la présence d'effets consécutifs

lors des post-tests correspondant à l'ajout ou au retrait des verres progressifs pour les trois groupes ayant bénéficié de la vision dynamique du mouvement.

#### Acquisition tard/ post-test vision

Dans cette section, nous allons évaluer si les résultats obtenus pour le groupe vision-normale/distorsion étaient inhérents à la mise en place d'adaptations visuo-motrices qui avaient pris place lors de la phase d'acquisition. Si cela était le cas, ces nouvelles corrélations visuo-motrices devraient générer des effets consécutifs durant le post-test où les verres progressifs étaient retirés. Pour tester cette hypothèse, nous avons calculé pour les trois groupes vision leur précision spatiale pour le dernier bloc de l'acquisition et pour le post-test en condition de vision où les verres progressifs étaient ajoutés (groupe vision-normale) ou retirés (groupe vision-normale/distorsion). Nous avons soumis ces données à une ANOVA contrastant 3 groupes (vision-normale/distorsion, plano, vision-normale) x 2 phases expérimentales (acquisition tard, post-test vision) x 4 positions de cible (supérieure-axiale, supérieure-latérale, inférieure-latérale, inférieure-axiale) en utilisant des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

De même qu'observé dans la première section de résultats conduite sur la précision spatiale, aucun effet principal ou d'interaction significatif impliquant la condition perceptive ou la phase expérimentale n'a été révélé ( $p_s > .15$ ). Les ANOVAs n'ont montré que des effets principaux de position de cible qui ne seront pas détaillés ici puisque non reliés à notre question d'intérêt.

L'absence d'effets consécutifs lors de l'ajout ou du retrait des verres progressifs suggère que des mécanismes de contrôle en temps réel pourraient avoir compensés les effets perceptifs générés par l'ajout ou le retrait des lunettes. Afin d'évaluer si l'ajout ou le retrait des verres progressifs pouvait affecter les mécanismes de contrôle mis en place nous avons étudié l'occurrence spatiale et temporelle aux différents pics cinématiques (accélération, vitesse, décélération, position terminale). Nous avons également calculé les coefficients de variabilité pour chacun de ces marqueurs. Ces variables dépendantes furent soumises individuellement à une ANOVA contrastant 3 conditions expérimentales (vision-normale/distorsion, plano, vision-normale) x 2 phases expérimentales x 4 positions de cible x 4 marqueurs cinématiques en utilisant des mesures répétées pour les trois derniers facteurs.

Les ANOVAs calculées sur ces différentes variables dépendantes ne révélèrent aucun effet principal ou d'interaction significatif impliquant la condition perceptive ou la phase expérimentale. Cependant, ces ANOVAs montrèrent des interactions significatives position de cible x marqueur cinématique révélant que l'occurrence spatiale et temporelle de chaque marqueur cinématique était légèrement mais significativement différente en fonction de la position de cible. Ces effets n'étant pas en lien direct avec l'objectif de cette étude, nous nous abstenons de les décrire ici. Les résultats du passage de l'acquisition au post-test montrent clairement qu'ajouter ou retirer les verres progressifs n'avait aucun impact sur la performance des participants qui avaient la possibilité de moduler leur mouvement sur la base des informations visuelles dynamiques. Il était cependant nécessaire d'évaluer si l'ajout ou le retrait des distorsions affectait la planification du mouvement.

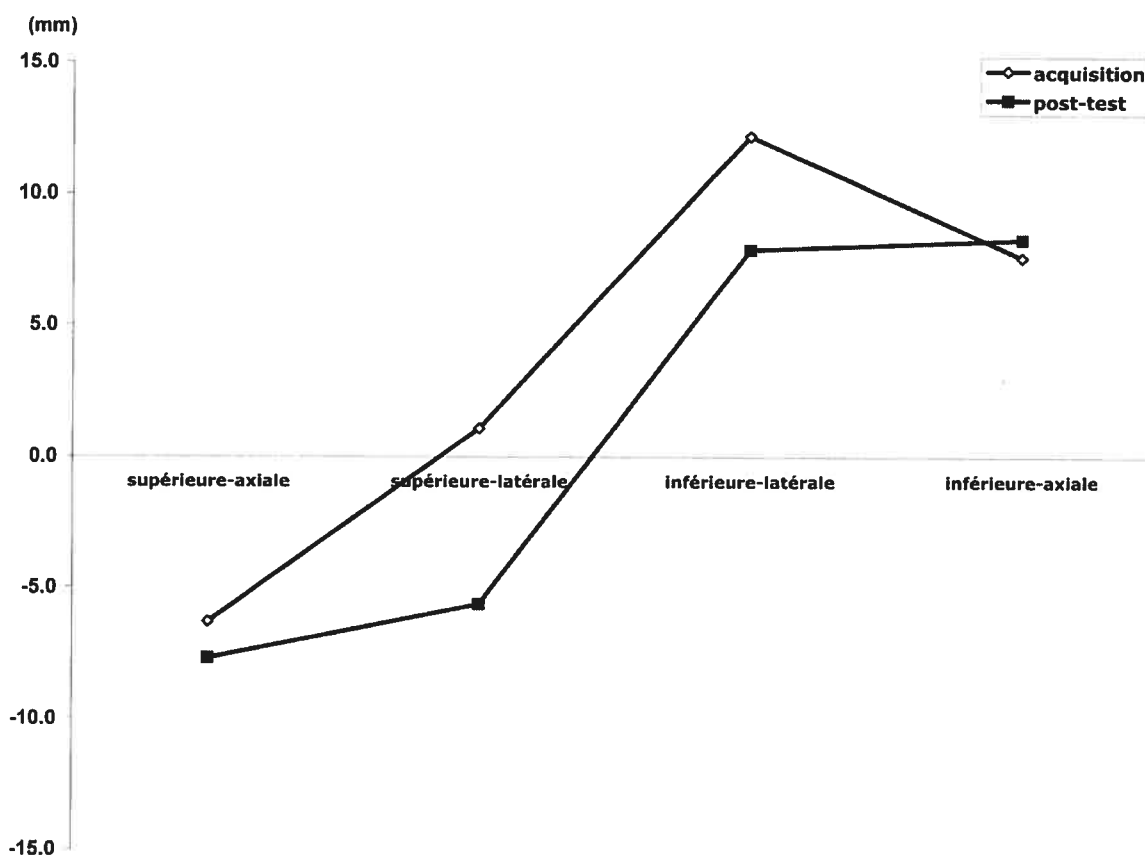
### Acquisition tard/ post-test cible-seule

Dans cette section, nous avons voulu évaluer si les adaptations potentiellement requises en présence de verres progressifs se mettaient en place lorsqu'une modulation sur la base des informations visuelles n'était pas possible. Le groupe cible-seule ne pouvait mettre en place une modulation du mouvement sur une base visuelle mais il bénéficiait cependant des mêmes informations visuelles statiques que les trois autres groupes; informations visuelles statiques sur lesquelles s'élaborait la planification du mouvement. Pour évaluer les mécanismes mis en jeu dans cette condition perceptive, nous avons comparé les résultats obtenus en fin d'acquisition et durant le post-test en condition cible-seule pour le groupe qui ne bénéficiait pas de l'information visuelle dynamique durant l'acquisition (groupe cible-seule/distorsion). Nous avons calculé la précision spatiale (erreur constante et variable au niveau latéral et sagittal) de ce groupe pour le dernier bloc de la phase d'acquisition et durant le post-test où l'on retirait les verres progressifs et où l'information visuelle dynamique n'était pas disponible. Les données de chaque variable dépendante furent soumises individuellement à une ANOVA contrastant 2 phases expérimentales (acquisition-tard, post-test cible-seule) x 4 positions de cible en utilisant des mesures répétées pour ces deux facteurs.

L'ANOVA calculée sur l'erreur constante latérale a révélé des effets principaux de phase expérimentale,  $F(1, 9) = 6.4$ , de position de cible,  $F(3, 27) = 8.0$ , ainsi qu'une interaction phase expérimentale x position de cible,  $F(3, 27) = 3.6$ . La décomposition de cette interaction est illustrée à la figure 5. Cette interaction n'a révélé aucun impact du retrait des verres progressifs sur l'erreur constante latérale pour les deux cibles axiales

lorsque l'on passe de l'acquisition au post-test. Par contre, les résultats montrent que durant le post-test les participants terminaient leurs mouvements significativement plus à la gauche des cibles latérales comparativement à ce qui était obtenu en fin d'acquisition.

**Figure 5** : erreur constante latérale (groupe cible-seule)



L'ANOVA calculée sur l'erreur variable latérale révéla un effet principal de position de cible,  $F(3, 27) = 20.7$ , qui montrait une variabilité significativement plus élevée pour la cible latérale-supérieure (14.5 mm) comparativement à la cible latérale-inférieure (10.95 mm) qui elle-même avait une plus grande variabilité que les deux cibles axiales qui ne se différençaient pas l'une de l'autre (moyenne de 5.6 mm).

Finalement, les ANOVAs calculées sur l'erreur constante sagittale et l'erreur variable sagittale ne révélèrent et aucun effet significatif ( $p_s > .15$ ).

En résumé, l'effet consécutif observé sur l'erreur constante latérale durant le post-test cible-seule suggère que des adaptations visuo-motrices ont pris place lorsque les participants du groupe cible-seule portaient les verres progressifs. Ces résultats indiquent que les biais perceptifs induits par les verres progressifs pourraient avoir affecté les processus de planification du mouvement et qu'en l'absence d'afférences visuelles dynamiques, aucune modulation efficace n'a pu prendre place.

#### Planification et contrôle du mouvement pour le groupe cible-seule/distorsion

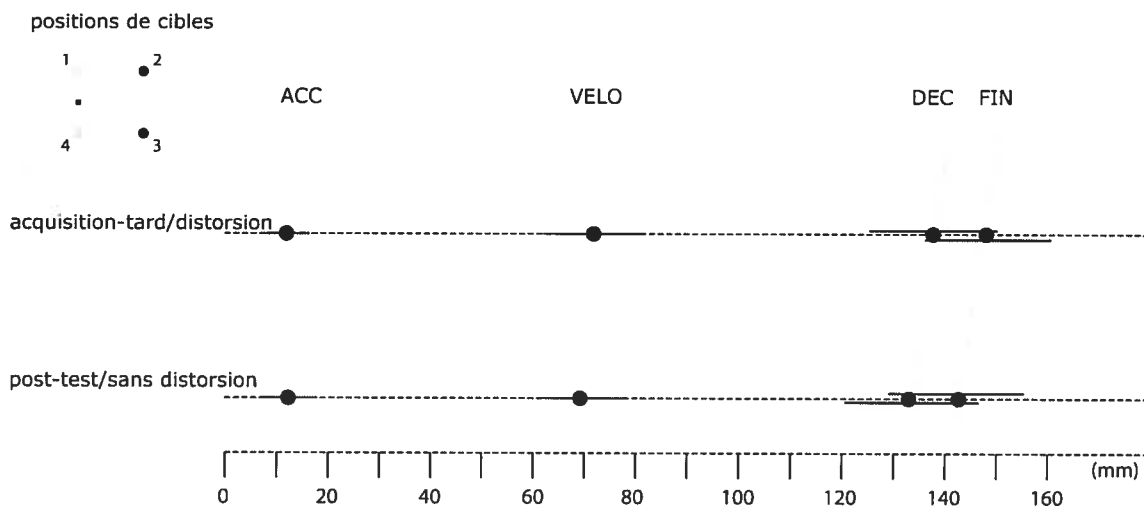
Pour déterminer si les verres progressifs affectaient la planification et pour évaluer les mécanismes de contrôle présents, nous avons procédé à d'autres analyses au sein du groupe cible-seule/distorsion. Nous avons évalué, pour les deux cibles latérales, où (longueur et orientation du vecteur de mouvement) et quand se produisaient les différents pics cinématiques (accélération, vitesse, décélération, position terminale) sur la dimension latérale du mouvement. Cette analyse fut conduite du fait de l'effet consécutif latéral révélé dans la précédente analyse ainsi que de l'absence d'erreur sagittale inhérente au port de verres progressifs. Nous avons également calculé le coefficient de variabilité à chaque marqueur cinématique. Ces données furent soumises individuellement à une ANOVA contrastant 2 phases expérimentales (acquisition-tard, post-test cible-seule) x 2 positions de cible (latérale supérieure; latérale-inférieure) x 4 marqueurs cinématiques (accélération; vitesse; décélération; position terminale) en utilisant des mesures répétées pour les trois derniers facteurs.

L'ANOVA calculée sur les données temporelles ne révéla aucun effet significatif ( $p > .15$ ). L'ANOVA calculée sur la longueur du vecteur de mouvement à chaque marqueur cinématique montra une interaction significative phase expérimentale x marqueur cinématique,  $F(3, 27) = 4.8$ . Cette interaction est illustrée à la figure 6. Sa décomposition ne révéla aucune différence significative entre les deux phases expérimentales à l'occurrence du pic d'accélération. Par contre, lors de la phase d'acquisition, le pic de décélération se produisait plus loin de la base de départ (136.2 mm) comparativement à l'occurrence spatiale obtenue en post-test (131.5 mm); cet effet restait vrai aux positions terminales (acquisition = 146.5 mm vs. post-test = 141.13 mm). Un biais similaire était visible dès le pic de vitesse bien que non significatif (acquisition = 70.3 mm vs. post-test = 67.7 mm;  $p = .09$ ). Transposés en valeurs relatives [(position latérale en fin d'acquisition)-(position latérale en post-test)/ (position latérale en fin d'acquisition)], les biais obtenus du pic de vitesse à la fin du mouvement sont très semblables (accélération = -1.9%, vitesse = 3.71%, décélération = 3.46%, position terminale = 3.68%) et montrent la présence de l'effet dès le pic de vitesse. L'ANOVA conduite sur l'orientation du vecteur de mouvement à chaque marqueur cinématique n'a révélé qu'un effet principal de position de cible,  $F(1, 9) = 10.2$ .

Finalement, l'ANOVA calculée sur les coefficients de variabilité a révélé un effet principal de marqueur cinématique,  $F(3, 27) = 13.1$ . L'analyse post-hoc montra une réduction significative de la variabilité entre le pic d'accélération (0.25) et le pic de vitesse (0.09) ainsi qu'entre le pic de vitesse (0.09) et le pic de décélération (0.07). Aucune différence significative relative à la variabilité ne fut enregistrée entre le pic de décélération et la position terminale du mouvement.



**Figure 6 :** Occurrence spatiale (en mm) aux différents marqueurs cinématiques pour les deux cibles latérales (tard dans l'acquisition et durant le post-test en condition cible-seule/sas distorsion) au sein du groupe cible-seule/distorsion.



## Résumé

Les résultats de l'expérience 2 ont montré que le système visuo-moteur était capable d'utiliser les afférences visuelles dynamiques pour compenser les biais perceptifs induits par les verres progressifs. En effet, les données des groupes ayant bénéficiés de la vision dynamique du mouvement ont montré que leur performance n'était pas affectée par l'ajout (groupe vision-normale) ou le retrait (groupe vision-normale/distorsion) des verres progressifs. De plus, aucune adaptation visuo-motrice inhérente au port ou au retrait de ces verres ne fut révélée (voir résultats des post-tests). Par contre, les résultats du groupe cible-seule ont montré qu'en l'absence d'afférences visuelles dynamiques, les verres progressifs avaient un impact sur la planification et la précision terminale des mouvements. Pour ce groupe, où aucune modulation en temps réel sur la base de la vision n'était possible, on a observé un biais à droite des cibles

latérales lors du port des verres progressifs. Durant le post-test sans lunettes, les résultats de précision spatiale montraient clairement une dérive des mouvements sur la gauche de ces cibles. Les résultats du post-test (sans lunettes) pour le groupe cible-seule/distorsion montrent clairement que durant l'acquisition, des adaptations visuo-motrices ont pris place pour les mouvements dirigés vers les cibles latérales. Ces adaptations résultent du fait que les cibles latérales se trouvaient dans des zones de plus fortes distorsions et qu'aucune modulation sur la base de la vision n'était possible pour ce groupe. Mis en commun, l'ensemble de ces résultats montre que le système visuo-moteur peut compenser en temps réel les distorsions induites par les verres progressifs seulement si la vision dynamique de l'effecteur est disponible.

Dans cette expérience, les cibles étaient fovéalisées suite à une saccade visuelle. Du fait de cette localisation par la rétine centrale, leurs positions spatiales pouvaient être extraites correctement même pour la cible inférieure-latérale située dans une zone de distorsions et d'aberrations optiques (vision floue). Il est donc possible que cette localisation, même si imprécise, ait permis d'élaborer un programme moteur acceptable qui était par la suite optimisé ou modulé par les mécanismes de contrôle en temps réel. Nous allons donc évaluer si de tels mécanismes sont toujours présents et efficaces lorsque la localisation de la cible est réalisée via la rétine périphérique pour laquelle la capacité de discrimination est moindre.

### Expérience 3

Le protocole expérimental de l'expérience 3 était strictement le même que celui qui fut utilisé dans l'expérience 2 à l'exception d'un point. Cette différence résidait dans

le fait que les participants devaient exécuter la tâche en fixant la base de départ en tout temps. Par conséquent, la localisation des cibles se faisait uniquement grâce la vision périphérique. Les deux cibles axiales étaient situées à  $15.6^{\circ}$  (positionnées à 14 cm de la base de départ pour un participant placé à 50 cm de l'écran) dans le champ visuel, tandis que les deux cibles latérales situées dans les zones de distorsion plus importantes étaient positionnées à  $21.6^{\circ}$  (positionnées à 19.8 cm de la base de départ pour un participant placé à 50 cm de l'écran). L'objectif de cette expérience était de déterminer si les mécanismes d'adaptation ou de planification/contrôle du mouvement mis en place en présence de verres progressifs lorsque les cibles sont localisées par la rétine périphérique.

### Résultats

Les analyses préliminaires ont montré que seulement 2% de l'ensemble des essais comportaient des corrections discrètes; ces essais n'ont pas été pris en compte dans les analyses qui vont suivre. Les résultats de la présente expérience sont rapportés sous le même format que ceux de l'expérience 2.

### Acquisition tôt/acquisition tard/recouvrement

La précision spatiale (erreurs constantes latérale et sagittale) ainsi que la dispersion des mouvements (erreurs variables latérale et sagittale) ont été calculées pour le premier et le dernier bloc de la phase d'acquisition ainsi que pour la phase de recouvrement. Ces données ont ensuite été soumises à une ANOVA contrastant 4 conditions expérimentales (vision-normale/distorsion, cible-seule/distorsion, plano,

vision-normale) x 3 phases expérimentales (acquisition tôt, acquisition tard, recouvrement) x 4 positions de cible (supérieure-axiale, supérieure-latérale, inférieure-latérale, inférieure-axiale) en utilisant des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

Afin de répondre à nos questions expérimentales, la présentation des résultats se fera essentiellement autour des effets principaux et d'interactions relatifs aux groupes expérimentaux et aux phases expérimentales. Cette décision a été prise pour faciliter la lecture des résultats étant donné que les résultats de ces analyses révélèrent des effets principaux de position de cible qui étaient largement identiques à ceux qui ont été obtenus pour l'expérience 2.

Les ANOVAs concernant les biais n'ont révélé aucune différence significative en fonction du groupe ou de la phase expérimentale et ceci tant sur la composante latérale que sagittale du mouvement ( $p_s > .15$ ). Les ANOVAs calculées sur la dispersion des mouvements ont montré que la dispersion des mouvements était significativement plus élevée pour le groupe cible-seule comparativement aux trois autres groupes et ceci sur les composantes latérale,  $F(3,36) = 56.58$ , et sagittale,  $F(3,36) = 77.78$ . Les données d'intérêt sont consignées dans les tableaux 2a et 2b.

De manière similaire à l'expérience 2, les résultats de précision spatiale obtenus ne montrent aucune différence significative entre le groupe vision-normale/distorsion et les deux autres groupes contrôles ayant bénéficiés de la vision (plano, vision-normale). Les mêmes comportements ayant été obtenus au sein de ces trois groupes, nous allons donc évaluer si les mouvements se déroulaient de la même manière pour ces trois conditions perceptives différentes.

**Tableau 2a** : synthèse des données de précision spatiale de l'expérience 3 lors de l'acquisition et du recouvrement.

	VD	CSD	PL	VN
<b>Cibles</b>	<b>Erreur constante latérale</b>			
Supérieure-axiale	0.88	-0.98	-0.08	0.82
Supérieure-latérale	3.21	3.88	2.96	1.81
Inférieure-latérale	0.33	1.80	0.06	-0.60
Inférieure-axiale	2.04	6.73	1.97	1.67
	<b>Erreur variable latérale</b>			
Supérieure-axiale	3.43	5.51	2.92	3.14
Supérieure-latérale	7.03	13.94	6.71	7.26
Inférieure-latérale	5.42	9.97	5.32	5.73
Inférieure-axiale	2.67	3.80	2.79	2.60
	<b>Erreur constante sagittale</b>			
Supérieure-axiale	0.43	-0.86	0.68	0.08
Supérieure-latérale	1.73	-2.73	1.74	-1.33
Inférieure-latérale	1.71	4.43	0.80	2.07
Inférieure-axiale	1.29	-2.40	1.03	1.28
	<b>Erreur variable sagittale</b>			
Supérieure-axiale	5.02	7.39	5.04	4.65
Supérieure-latérale	5.30	10.12	5.64	5.98
Inférieure-latérale	5.22	10.01	5.51	5.48
Inférieure-axiale	4.45	9.39	4.47	4.45

**Tableau 2b** : synthèse des données de précision spatiale de l'expérience 2 lors de l'acquisition et du recouvrement (à titre comparatif).

	VD	CSD	PL	VN
<b>Cibles</b>	<b>Erreur constante latérale</b>			
Supérieure-axiale	-0.58	-6.46	-0.83	-0.48
Supérieure-latérale	-1.47	1.41	-1.24	-1.31
Inférieure-latérale	-1.07	11.69	-2.09	-1.07
Inférieure-axiale	1.84	7.38	1.68	1.68
	<b>Erreur variable latérale</b>			
Supérieure-axiale	2.37	5.75	2.42	2.42
Supérieure-latérale	3.43	13.55	4.16	3.29
Inférieure-latérale	3.02	10.47	3.01	3.17
Inférieure-axiale	1.95	4.24	2.35	2.04
	<b>Erreur constante sagittale</b>			
Supérieure-axiale	-2.84	7.85	-2.99	-1.82
Supérieure-latérale	-1.02	7.00	-1.70	-0.75
Inférieure-latérale	1.93	-1.54	2.05	2.04
Inférieure-axiale	2.88	-8.41	2.60	2.33
	<b>Erreur variable sagittale</b>			
Supérieure-axiale	2.75	9.18	2.91	2.72
Supérieure-latérale	2.88	10.17	3.28	2.74
Inférieure-latérale	2.97	9.34	2.95	3.29
Inférieure-axiale	2.87	10.06	2.79	2.84

Pour évaluer la manière dont les mouvements étaient influencés par les conditions expérimentales de cette expérience, nous avons évalué où (longueur et orientation du vecteur de mouvement) et quand se manifestaient les pics d'accélération, de vitesse, de décélération ainsi que la fin des mouvements. Nous avons aussi calculé les coefficients de variabilité à chacun de ces marqueurs cinématiques. Nous avons ensuite soumis ces données de manière individuelle à une ANOVA. Cette ANOVA contrastait 3 conditions expérimentales (vision-normale, distorsion, plano, vision-normale) x 3 phases expérimentales (acquisition tôt, acquisition tard, recouvrement) x 4 positions de cible (supérieure-axiale, supérieure-droite, inférieure-droite, inférieure-axiale) x 4 marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération, fin du mouvement) en utilisant des mesures répétées pour les trois derniers facteurs.

Les ANOVAs calculées sur ces variables dépendantes ont révélé des interactions significatives marqueur cinématique x position de cible, mais aucun effet principal ou d'interaction significatifs impliquant les groupes expérimentaux ou les phases expérimentales. Les valeurs moyennes des variables dépendantes obtenues pour chaque groupe sont résumées en annexe A dans les tableaux 3a et 3b.

Les analyses conduites durant la phase d'acquisition et de recouvrement pour les groupes ayant bénéficiés de la vision n'ont montré aucun effet significatif différenciant ces groupes expérimentaux par rapport aux variables explorées. Ces résultats suggèrent que les participants qui portaient les verres progressifs ont rapidement mis en place une stratégie de planification/contrôle du mouvement qui leur permettaient d'éliminer les biais induits par les lunettes. Tel que nous l'avons fait dans l'expérience 2, nous allons

procéder à une série d'analyses pour évaluer la présence d'effets consécutifs lors des post-tests. De tels effets souligneraient la mise en place d'adaptations visuo-motrices.

#### Acquisition tard/ post-test vision-normale

Nous avons calculé pour les trois groupes qui pratiquaient avec la vision dynamique du mouvement, les biais (erreur constante latérale et sagittale) et la variabilité (erreur variable latérale et sagittale) et les temps de mouvement lors du dernier bloc de la phase d'acquisition et durant le post-test en vision. Lors de l'acquisition les participants des groupes vision/distorsion (verre progressif) et plano (verre neutre) portaient les lunettes qui leur avaient été attribuées tandis que les participants du groupe visio-normale ne portaient pas de lunettes. En post-test, les participants des groupes vision/distorsion et plano devaient retirer leurs lunettes alors que les participants du groupe vision-normale devaient porter leurs verres progressifs. Ces données ont été soumises à une ANOVA contrastant 3 conditions perceptives (vision-normale/distorsion, plano, vision-normale) x 2 phases expérimentales (acquisition tard, post-test vision) x 4 positions de cible (supérieure-axiale, supérieure-latérale, inférieure-latérale, inférieure-axiale) en utilisant des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

Les résultats de ces ANOVAs calculées sur la précision spatiale ne montrèrent aucun effet principal ou d'interaction significatif impliquant les conditions expérimentales ou les phases expérimentales; les valeurs moyennes obtenues pour ces variables dépendantes sont résumées en annexe A dans le tableau 4. La similarité des résultats obtenus pour ces trois groupes expérimentaux suggère de nouveau l'implication

de mécanismes de contrôle qui auraient compensé les effets de l'ajout (groupe vision-normale) ou du retrait (groupe vision-normale/distorsion) des verres progressifs ou une optimisation de la planification résultant de la pratique.

Pour évaluer la présence de ces mécanismes, nous avons calculé les valeurs vectorielles (longueur et orientation) relatives à l'occurrence des différents marqueurs cinématiques. Nous avons aussi calculé les coefficients de variabilité spatiale à chaque marqueur puis nous avons soumis individuellement l'ensemble de ces données à une ANOVA contrastant 3 conditions expérimentales x 2 phases expérimentales x 4 positions de cible x 4 marqueurs cinématiques en utilisant des mesures répétées pour les trois derniers facteurs.

Les ANOVAs conduites sur l'occurrence spatio-temporelle et sur les coefficients de variabilité n'ont révélé aucun effet principal ou d'interaction significatif relatif aux groupes expérimentaux ou aux phases expérimentales ( $p_s > .15$ ; voir en annexe A les tableaux 5a à 5c). Ceci suggère que la planification est tellement floue que les biais induits par les lunettes ne dépassent pas la variabilité normale de la planification et que ceux-ci sont éliminés par les mécanismes de contrôle en temps réel du mouvement. Pour évaluer quel type de mécanisme se mettait en place lorsqu'aucun contrôle en temps réel sur la base des informations visuelles était possible nous avons procédé à une autre série d'analyses.



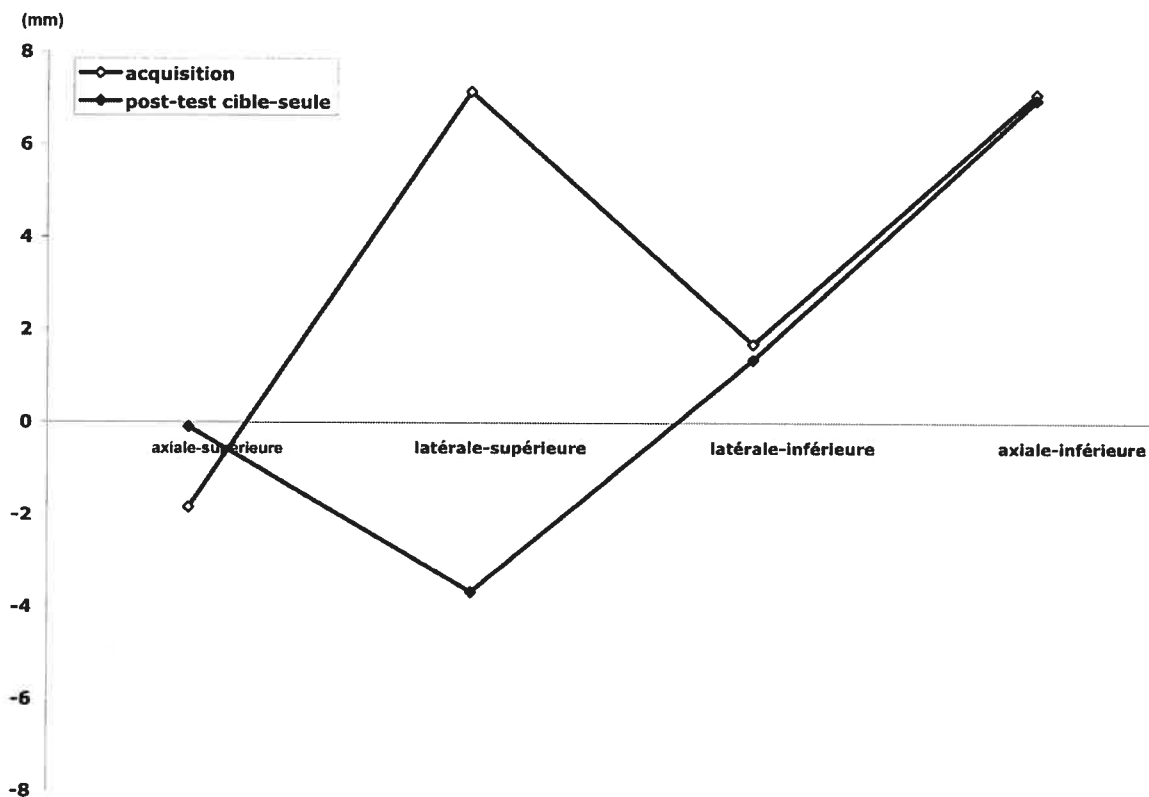
### Acquisition tard/ post-test cible-seule

Nous avons calculé, pour le groupe cible-seule/distorsion, la précision spatiale lors du dernier bloc d'acquisition et durant le post-test en condition cible-seule. Les données de chaque variable dépendante ont été soumises individuellement à une ANOVA contrastant 2 phases expérimentales (acquisition tard, post-test cible-seule) x 4 positions de cibles (supérieure-axiale, supérieure-latérale, inférieure-latérale, inférieure-axiale) en utilisant des mesures répétées pour ces deux facteurs.

L'ANOVA calculée sur l'erreur constante latérale, illustrée à la figure 7, a révélé une interaction significative phase expérimentale x position de cible,  $F(3, 27) = 6.4$ . La décomposition de cette interaction a montré que de l'acquisition au post-test, la position terminale de la cible supérieure latérale subissait une dérive vers la gauche. Aucune différence significative n'a été observée pour les trois autres positions de cible lorsque l'on passait de l'acquisition au transfert ( $p_s > .15$ ). Le facteur phase expérimentale n'était significatif pour aucune autre variable dépendante.

L'effet consécutif révélé par les résultats du post-test sur l'erreur constante latérale montre un impact sur le mouvement du port des verres progressifs. Cet impact se caractérise par un biais à droite pour les mouvements dirigés vers la cible supérieure-latérale. Suite à ce résultat, nous avons évalué comment la planification/contrôle du mouvement était affectée pour cette condition expérimentale.

**Figure 7 :** Erreur constante (EC) sagittale obtenue pour les quatre positions de cible lors de l'acquisition et du post-test en condition cible seule au sein du groupe cible-seule/distorsion

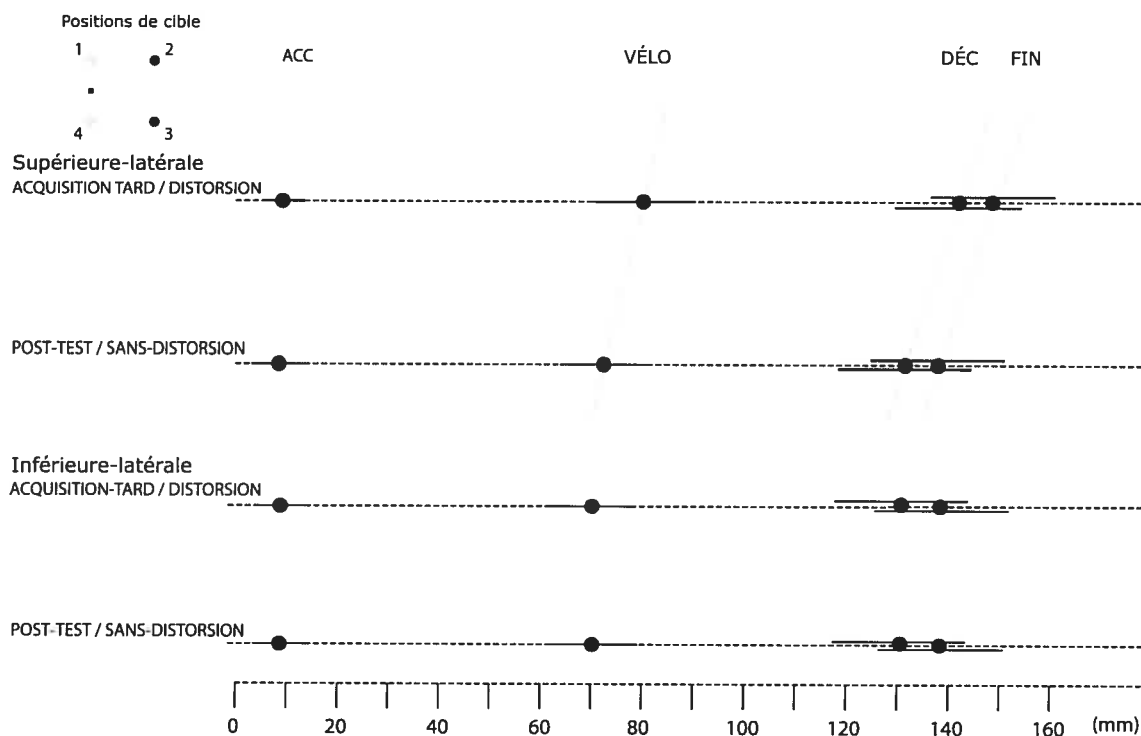


Suite à l'effet consécutif obtenu sur la composante latérale du mouvement, nous avons évalué où (longueur et orientation de vecteur) et quand se manifestaient les marqueurs cinématiques pour les deux cibles latérales. Nous avons procédé à cette analyse sur les deux cibles afin d'être consistant avec l'analyse effectuée dans l'expérience 2. Les coefficients de variabilité pour chacun de ces marqueurs ont également été calculés et l'ensemble de ces variables fut soumis individuellement à une ANOVA contrastant 2 phases expérimentales (acquisition tard, post-test cible-seule) x 2

positions de cible (latérale-supérieure, latérale-inférieure) x 4 marqueurs cinématiques en utilisant des mesures répétées pour ces trois facteurs.

L'ANOVA calculée sur les données de longueur de vecteur a révélé une interaction significative phase expérimentale x marqueur cinématique x position de cible,  $F(3, 27) = 4.2$ ;  $p = .055$ . Cette interaction est illustrée à la figure 8 et montre que de l'acquisition au post-test aucune différence significative relative à l'occurrence spatiale des marqueurs cinématiques n'a été trouvée pour la cible latérale-inférieure. Pour la cible latérale-supérieure, les résultats montrent que du pic de vitesse à la fin du mouvement, les marqueurs se manifestent plus près de la base de départ en post-test (accélération = 7.6 mm; vitesse = 70.89 mm, décélération = 130 mm, position terminale = 136.4 mm) comparativement à l'acquisition (accélération = 6.9 mm; vitesse = 78.7 mm, décélération = 140.6 mm, position terminale = 147.1 mm). Ces résultats observés dès le pic de vitesse suggèrent que les lunettes ont induit un biais de planification.

**Figure 8** : Occurrence spatiale (en mm) aux différents marqueurs cinématiques pour les deux cibles latérales (tard dans l'acquisition et durant le post-test en condition cible-seule/sas distorsion) au sein du groupe cible-seule/distorsion.

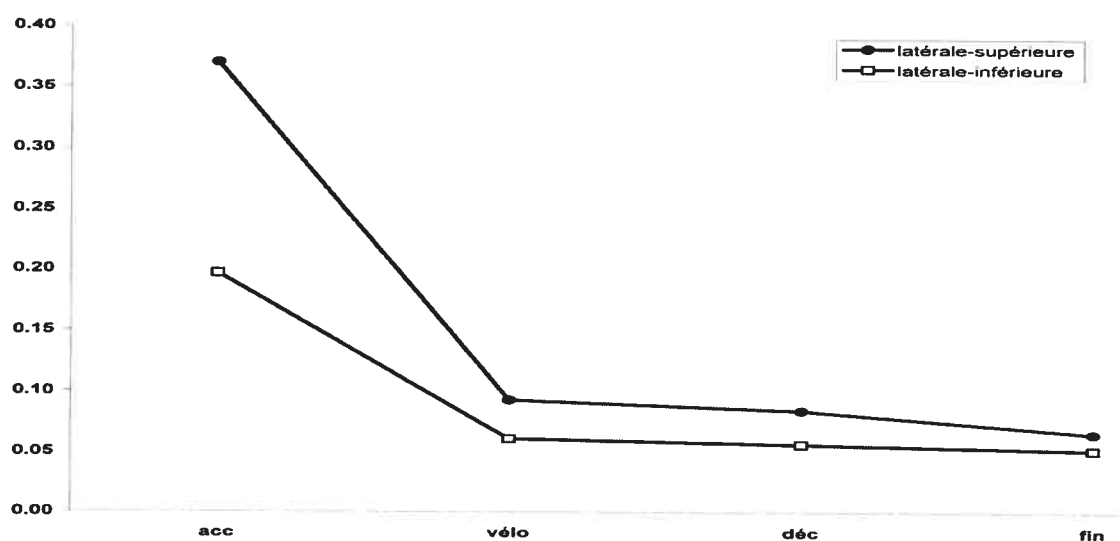


L'ANOVA calculée sur les données temporelles a montré une interaction significative position de cible x marqueur cinématique,  $F(3, 27) = 3.9$ , indiquant que l'occurrence des marqueurs cinématiques se faisait significativement plus tard d'un marqueur à l'autre et que cette occurrence temporelle était significativement plus tardive dans l'axe de plus grande inertie, i.e., pour les mouvements dirigés vers la cible inférieure.

L'ANOVA calculée sur les coefficients de variabilité illustrés à la figure 9 a montré une interaction significative marqueur cinématique x position de cible,  $F(3, 27) = 5.59$ . La décomposition de cette interaction montre une plus grande variabilité pour la

cible supérieure-latérale comparativement à la cible inférieure-latérale. Les résultats de l'ANOVA montrent également, pour les deux cibles, une diminution significative de la variabilité du pic d'accélération (0.37 et 0.2, respectivement) au pic de vitesse (0.09 et 0.06, respectivement), suivie d'une stabilisation jusqu'en fin de mouvement.

**Figure 9 :** Coefficients de variabilité obtenus pour les deux cibles latérales lors des phases d'acquisition et de post-test en condition cible-seule/sans distorsion



En résumé, les résultats de l'expérience 3 ont démontré que les verres progressifs n'avaient pas d'impact sur la précision des mouvements quand la cible considérée était localisée en vision périphérique et ceci sous la condition que les informations visuelles dynamiques étaient disponibles. Par contre pour le groupe cible-seule, l'analyse du post-test en condition cible-seule révéla un effet consécutif pour la cible supérieure-latérale. Cet effet consécutif est synonyme de la mise en place d'une adaptation visuo-motrice pour cette position de cible.

## Discussion

### Compensation des distorsions complexes

Les résultats des expériences 2 et 3 montrent que, sur la base des informations visuelles dynamiques, le système visuo-moteur est capable de compenser en temps réel les distorsions multiples imposées par les verres progressifs. Il faut noter qu'en termes dioptriques, les effets optiques des verres progressifs n'excèdent pas les cinq dioptries. Malgré le côté non linéaire de ces distorsions au sein du champ visuel il semble que dans le cadre d'une tâche de pointage vidéo, le système visuo-moteur soit assez flexible pour compenser cette variabilité perceptive. En effet, puisque les résultats suggèrent que la planification mise en place pour ces mouvements soit approximative, il semble que les biais induits par nos manipulations expérimentales ne dépassent pas la variabilité normale du système. De plus, les mécanismes de compensations mis en jeu semblent similaires à ceux décrits dans des études montrant la modulation de la première impulsion de mouvement (Lhuisset & Proteau, 2002; Sarlegna, Blouin, Bresciani, Bourdin, Vercher & Gauthier, 2003; Sarlegna, Blouin, Vercher, Bresciani, Bourdin & Gauthier, 2004; Bédard & Proteau, 2004). Comme dans ces études, nous avons observé une modulation du mouvement qui permettait d'assurer la précision spatiale du mouvement lorsque les afférences visuelles dynamiques étaient présentes. Nos résultats précisent que ces compensations prennent place même en présence de distorsions optiques complexes. La compensation des effets des verres progressifs repose toutefois sur la disponibilité des informations visuelles dynamiques. D'ailleurs, les résultats du groupe cible-seule (post-test en condition cible-seule) montrent clairement que les

processus contrecarrant l'effet des verres progressifs sont abolis en l'absence de la vision dynamique du mouvement. En effet, on note pour ce groupe un biais final lorsque les lunettes sont portées; biais qui est absent en post-test lors du retrait des verres progressifs. De plus, ces mécanismes décrits semblent se mettre en place très rapidement suite à l'exposition à ce type de distorsion. Une sous-analyse, conduite lors de l'acquisition et les post-tests sur les premiers essais de chaque phase, a également montré l'absence de perturbations relatives à l'ajout ou au retrait des verres progressifs lorsque les afférences visuelles étaient présentes. Lors de cette analyse, la précision/variabilité des mouvements a clairement montré qu'il n'y avait pas de biais final qui était induit par les verres progressifs (voir figures 10 à 13 dans l'annexe A). Finalement, une analyse de l'occurrence spatiale des marqueurs cinématiques pour ces premiers essais n'a montré aucun biais sur la planification (voir figures 14 à 17 dans l'annexe A). Il semble donc que la planification est trop approximative pour que la taille des illusions induites par les verres progressifs ait un effet en condition de vision et dans ce contexte expérimental.

#### Altération de la planification en l'absence des informations visuelles

Concernant le groupe n'ayant pas bénéficié de la vision de leur mouvement durant la pratique, les résultats du post-test de l'expérience 2 ont montré que la planification du mouvement était affectée pour les deux cibles se trouvant dans les zones de plus grande distorsion. Par contre, lors de l'expérience 3 cet impact sur la planification disparu pour la cible inférieure-latérale. Ceci peut être dû à des considérations perceptives spécifiques de la zone optique dans laquelle se situait la cible.

En effet, la cible inférieure-latérale se trouvait dans une zone combinant aberrations optiques (vision floue) et distorsions. La combinaison de la vision floue due aux aberrations optiques et d'une localisation rétinienne périphérique de la cible a pu masquer les distorsions de verres progressifs. Ceci expliquerait l'absence d'effet dans ce cas particulier comparativement à l'expérience 2 où la localisation de la cible dans cette zone du champ visuel se faisait de manière fovéale. Dans cet ordre d'idée, il est possible que même si la cible supérieure était aussi localisée en périphérie l'effet du verre ait persisté du fait d'aberrations optiques beaucoup moins élevées dans la portion supérieure du verre.

À la lumière de l'ensemble de ces résultats, il apparaît clairement que le système visuo-moteur est apte à compenser rapidement les distorsions complexes générées par les verres progressifs. Ces résultats n'expliquent donc pas pourquoi certains nouveaux porteurs de verres progressifs ont de la difficulté à s'adapter à ces verres lors de leurs activités quotidiennes. Cependant, l'ensemble des résultats récoltés ici a été obtenu dans des conditions où aucun mouvement n'était présent au sein de la scène visuelle. Or, des observations cliniques récentes suggèrent que les difficultés rencontrées par les nouveaux porteurs de verres progressifs se manifestent surtout lorsqu'il y a du mouvement au sein de la scène visuelle ou lorsque ceux-ci produisent des mouvements de la tête. Pour évaluer si les mouvements au sein de la scène visuelle sont des déterminants des problèmes adaptatifs liés aux verres progressifs, nous avons élaboré une tâche où du mouvement au sein de la scène visuelle était généré par des rotations de la tête et ceci lors du port de verres progressifs. De plus, nous avons décidé d'évaluer un groupe de personnes âgées afin d'évaluer si le vieillissement était un des facteurs



généralant ces problèmes d'adaptation à des conditions perceptives complexes. Cette précaution a été prise puisque le port de telles lentilles arrive à 40 ans.

## Bibliographie

- 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(1), 75-85.
- Faubert, J., & Overbury, O. (2000). Binocular vision in older people with adventitious visual impairment: sometimes one eye is better than two. *J Am Geriatr Soc*, 48(4), 375-380.
- Gresset J, Fauquier C, Frenette B, Lamarre M, Bourdoncle B, Simonet P, Forcier P, Faubert J.«Validation of a questionnaire on distortion perception among progressive addition lenses wearers» *Vision Science and its Applications*, OSA Technical Digests Series, Optical Society of America, Washington DC 2000; 218-221.
- Herbert, A. M., Overbury, O., Singh, J., & Faubert, J. (2002). Aging and bilateral symmetry detection. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 57(3), P241-245.
- Karniel, A., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2002). Does the motor control system use multiple models and context switching to cope with a variable environment? *Exp Brain Res*, 143(4), 520-524.
- Khan, M. A., Elliot, D., Coull, J., Chua, R., & Lyons, J. (2002). Optimal control strategies under different feedback schedules: kinematic evidence. *J Mot Behav*, 34(1), 45-57.

- Khan, M. A., Lawrence, G., Fourkas, A., Franks, I. M., Elliott, D., & Pembroke, S. (2003). Online versus offline processing of visual feedback in the control of movement amplitude. *Acta Psychol (Amst)*, *113*(1), 83-97.
- Krakauer, J. W., Ghez, C., & Ghilardi, M. F. (2005). Adaptation to visuomotor transformations: consolidation, interference, and forgetting. *J Neurosci*, *25*(2), 473-478.
- Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nat Neurosci*, *2*(11), 1026-1031.
- Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., Mentis, M., Barnes, A., Veytsman, M., Eidelberg, D., et al. (2004). Differential cortical and subcortical activations in learning rotations and gains for reaching: a PET study. *J Neurophysiol*, *91*(2), 924-933.
- Krakauer, J. W., Pine, Z. M., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (2000). Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *J Neurosci*, *20*(23), 8916-8924.
- Lhuisset, L., & Proteau, L. (2002). Developmental aspects of the control of manual aiming movements in aligned and non-aligned visual displays. *Exp Brain Res*, *146*(3), 293-306.
- Pine, Z. M., Krakauer, J. W., Gordon, J., & Ghez, C. (1996). Learning of scaling factors and reference axes for reaching movements. *Neuroreport*, *7*(14), 2357-2361.
- 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*(4), 367-384.

- Redding, G. M., & Wallace, B. (2004). First-trial adaptation to prism exposure: artifact of visual capture. *J Mot Behav*, *36*(3), 291-304.
- Redding, G. M., Rossetti, Y., & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method. *Neurosci Biobehav Rev*, *29*(3), 431-444.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Bresciani, J. P., Bourdin, C., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (2003). Target and hand position information in the online control of goal-directed arm movements. *Exp Brain Res*, *151*(4), 524-535.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Vercher, J. L., Bresciani, J. P., Bourdin, C., & Gauthier, G. M. (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. *Exp Brain Res*, *157*(4), 468-471.
- Trick, G. L., & Silverman, S. E. (1991). Visual sensitivity to motion: Age-related changes and deficits in senile dementia of the alzheimer type. *Neurology*, *41*(9), 1437-1440.
- Wojciechowski, R., Trick, G. L., & Steinman, S. B. (1995). Topography of the age-related decline in motion sensitivity. *Optom Vis Sci*, *72*(2), 67-74.
- Yap, M., Brown, B., & Clarke, J. (1994). Reduction in stereoacuity with age and reduced retinal illuminance. *Ophthalmic Physiol Opt*, *14*(3), 298-301.

## Chapitre 5

### Contrôle du mouvement, verres progressifs et vieillissement

## Introduction

Lors des chapitres précédents, nous avons évalué le mode de contrôle mis en place durant une tâche contrainte de manière spatiale (expérience 1). Nos résultats ont montré que le mode de contrôle impliqué dans ce type de tâche était assez similaire à celui observé dans des tâches contraintes de manière temporelle et s'articulait au moins en partie, autour de la modulation en temps réel de la première impulsion de mouvement (Proteau & Isabelle, 2002; Khan, Elliott, Coull, Chua, & Lyons, 2002; Lhuisset & Proteau, 2002; Khan, Lawrence, Fourkas, Franks, Elliott, & Pembroke, 2003a; Bédard & Proteau, 2004). Cependant, notre étude concernant la tâche contrainte de manière spatiale a montré la possibilité d'avoir recours à une correction discrète lorsque la modulation de la première impulsion ne permettait pas de terminer son mouvement sur la cible. Ainsi, il apparaît que le mode de contrôle par modulation de la première impulsion de mouvement et le mode de contrôle à correction discrète sont complémentaires. De plus, les données obtenues lors de l'expérience 1 ont montré que la production d'une correction discrète se faisait uniquement lorsque la variabilité inhérente à la planification du mouvement était telle que celui-ci s'éloignait largement de la cible visée. Dans ce cas de figure, la modulation de la première impulsion n'était pas suffisante pour que le mouvement finisse sur la cible d'où la nécessité d'une impulsion de correction.

En plus de la similitude entre les modes de contrôle mis en place pour les tâches contraintes de manière spatiale ou temporelle, la constante qui ressortait était que l'efficacité de ces mécanismes de contrôle reposait sur la disponibilité des informations

visuelles dynamiques. Les modes de contrôle mis en place dans des tâches contraintes de manière spatiale ou temporelle étant assez similaires, nous pouvions alors évaluer la performance motrice en présence de distorsions optiques avec l'un ou l'autre type de tâche (spatiale ou temporelle).

Nous avons alors évalué le mode de planification/contrôle du mouvement qui se mettait en place durant une tâche de pointage contrainte de manière temporelle (expériences 2 et 3) lorsque l'on ajoutait un biais par le port de verres à foyer progressif; biais qui était variable d'un point de la lentille à un autre. Afin d'éviter tout effet lié au vieillissement et pour mieux évaluer les mécanismes de planification et de contrôle du mouvement qui se mettaient en place lors du port de ces verres, nos groupes étaient constitués de participants jeunes et non-presbytes. L'un des objectifs des expériences 2 et 3 était d'évaluer s'il y avait une mise en place de mécanismes d'adaptation lorsque les perturbations perceptives imposées étaient subtiles. Plus spécifiquement nous voulions évaluer si lors d'une distorsion optique plus subtile, le conflit vision-proprioception était assez évident pour la mise en place d'un nouveau modèle interne. Les résultats de ces expériences ont montré que la planification du mouvement pouvait être affectée par le port de lunettes à foyer progressif dans les situations où l'information visuelle dynamique relative au mouvement n'était pas disponible. Par contre, cet impact des verres progressifs sur la planification du mouvement était absent lorsque les participants bénéficiaient de la vision dynamique du mouvement. Ceci était valable dès le premier essai. On observait également dans les expériences 2 et 3 des mécanismes de modulation du mouvement lorsque les informations visuelles dynamiques étaient disponibles. Cette

modulation du mouvement suffisait à contrecarrer l'impact des verres progressifs et était assez efficace par rapport aux biais induits par ces lunettes.

Suite à ces premières expériences, nous avons voulu évaluer les mécanismes de planification et de contrôle du mouvement qui se mettaient en place chez la population qui rapporte des problèmes d'acclimatation à ce type de verre, les personnes presbytes. Plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés à des participants âgés et nouveaux porteurs de verres progressifs pour qui il a été relevé un certain nombre de problèmes d'acclimatation à ces lunettes. En effet, on relève en clinique qu'un certain nombre de nouveaux porteurs de verres progressifs ont des imprécisions motrices ou des mouvements inadaptés dus à une mauvaise perception de la distance ou de la position d'objets dans l'espace et ceci même pour des mouvements bien appris. Les difficultés relevées au sein de cette population pourraient résulter de problèmes adaptatifs inhérents au vieillissement et consécutifs à l'environnement perceptif complexe généré par les verres progressifs. Il apparaissait donc important d'étudier les mécanismes de planification et de contrôle du mouvement mis en jeu lors du port de ce type de verres afin de mieux comprendre les difficultés perceptivo-motrices présentes chez certains presbytes nouveaux porteurs de verres progressifs.

Une telle étude pouvait permettre d'obtenir des données théoriques dans le cadre du vieillissement normal du système visuel et en rapport avec les interactions visuo-motrices présentes lors de l'exposition à ce type de distorsions optiques. Il est en effet possible que certains contextes perceptivo-moteurs soient plus difficilement compensables lors du vieillissement du fait d'une moins bonne intégration des



informations visuelles et d'une modulation du mouvement moins efficace que chez le jeune adulte.

Dans cet ordre d'idée, des études ont montré qu'avec l'âge, le système visuel perdait de sa capacité à traiter de manière optimale les stimuli visuels complexes et les attributs liés à la texture, au mouvement et à la profondeur (pour une revue, voir Faubert, 2002). Par exemple, Habak et Faubert (2000) ont évalué chez des participants jeunes et âgés (+ de 60 ans) des seuils de détection de l'orientation de mouvement pour des stimuli simples (premier ordre) et complexes (second ordre; stimuli complexes requérant des niveaux d'intégration corticale de plus haut niveau). Les stimuli de premier ordre étaient représentés par des plages circulaires définies en bandes de luminance qui pouvaient défiler vers la droite ou la gauche à différentes vitesses (2 Hz, 4 Hz ou 8 Hz). Les stimuli de second ordre étaient représentés par des plages circulaires définies par des bandes de contrastes qui pouvaient défiler vers la droite ou la gauche à différentes vitesses (2 Hz, 4 Hz ou 8 Hz). Le contraste minimum (défini par un critère de 75% de réponses correctes) nécessaire à la discrimination de la direction du mouvement était défini avant chaque expérience et pour chaque participant. L'ordre de présentation des différentes conditions de test (vitesse et direction des stimuli) était contrebalancé entre chaque participant.

Les résultats de cette expérience de sensibilité au mouvement ont montré que les participants âgés avaient des seuils de détection beaucoup plus élevés que les participants jeunes et ceci tant pour la détection de stimuli simples (facteur de 1.5) que complexes (facteur de 2). Ce type de résultat a été obtenu pour d'autres attributs visuels (Trick & Silverman, 1991; Wojciechowsky, Trick, & Steinman, 1995; Yap, Brown, &

Clarke, 1994; Faubert & Overbury, 2000; Herbert, Overbury, Singh, & Faubert, 2002) et confirment qu'avec l'âge, le système visuel perd de sa capacité de discrimination pour certains domaines de la vision et que l'altération fonctionnelle observée est majorée avec la complexité des stimuli; i.e., quand le degré d'intégration corticale nécessaire est de plus haut niveau (pour une revue, voir Faubert, 2002).

Ce type d'altération de système lié au vieillissement a également été démontré au niveau moteur pour certains aspects de la planification ou du contrôle du mouvement. Par exemple, il a été montré que les personnes âgées mettaient plus de temps que des jeunes pour effectuer les différentes opérations de programmation d'un mouvement surtout dans le cadre d'une tâche où le traitement de l'information s'avèrait plus complexe. Stelmach, Goggin et Amrhein (1988) utilisèrent une procédure d'évaluation du temps de réaction dans des conditions où les participants avaient la connaissance préalable d'aucun, de plusieurs ou de tous les paramètres caractérisant le mouvement à produire. Le montage expérimental consistait en deux bases de départ situées de part et d'autre de l'axe sagittal-médian des participants. Les participants posaient une main sur chaque base de départ (la main droite sur la base de départ située à droite et vice versa). Les mouvements pouvaient être effectués vers quatre cibles différentes pour chaque main. Deux cibles étaient positionnées vers le haut et deux vers le bas, et ceci à des distances courtes ou longues. Ainsi, les mouvements dirigés vers chacune des huit cibles pouvaient se caractériser selon trois dimensions qui étaient la main (droite ou gauche), la direction (haut ou bas) et l'étendue (courte ou longue). La connaissance des paramètres du mouvement était fournie grâce à un indice précédant l'exécution du mouvement, ce qui permettait au participant de préparer certains aspects du mouvement.

Les résultats de cette expérience ont montré qu'en termes absolus l'augmentation du temps de réaction était plus marquée chez les personnes âgées et s'amplifiait avec le nombre de dimension à reprogrammer.

D'autres études ont montré des différences de performance motrice liées au vieillissement. Dans un protocole de pointage vidéo, des participants jeunes et âgés (65-75 ans) devaient atteindre une petite cible le plus rapidement possible en manipulant une souris d'ordinateur dont la position était représentée par un curseur à l'écran (Walker, Philbin, & Fisk, 1997). L'étude de la variabilité de ces mouvements montrait que celle-ci augmentait en fonction de la valeur du pic d'accélération. Cependant les résultats montraient que la pente de cette relation était beaucoup plus prononcée pour les participants âgés comparativement aux participants jeunes. Ceci indiquait que pour une force donnée, le bruit au niveau moteur était plus élevé pour les participants âgés. Ces résultats suggéraient donc que pour un même temps de mouvement, la probabilité de manquer une cible était plus importante chez des personnes âgées que chez des jeunes du fait d'une plus grande variabilité de leur mouvement. Ceci explique en partie pourquoi les participants âgés mettaient plus de temps que les participants jeunes pour effectuer leur mouvement (743 ms vs. 549 ms). Une analyse plus spécifique montrait que la première impulsion de mouvement des participants âgés avait une étendue moindre et un temps de mouvement plus élevé comparativement aux résultats obtenus pour les jeunes. Finalement, les données montraient également que les participants âgés produisaient plus de corrections que les jeunes.

L'ensemble des résultats de ces expériences comparant la performance motrice entre participants jeunes et âgés montre que plusieurs aspects du mouvement sont

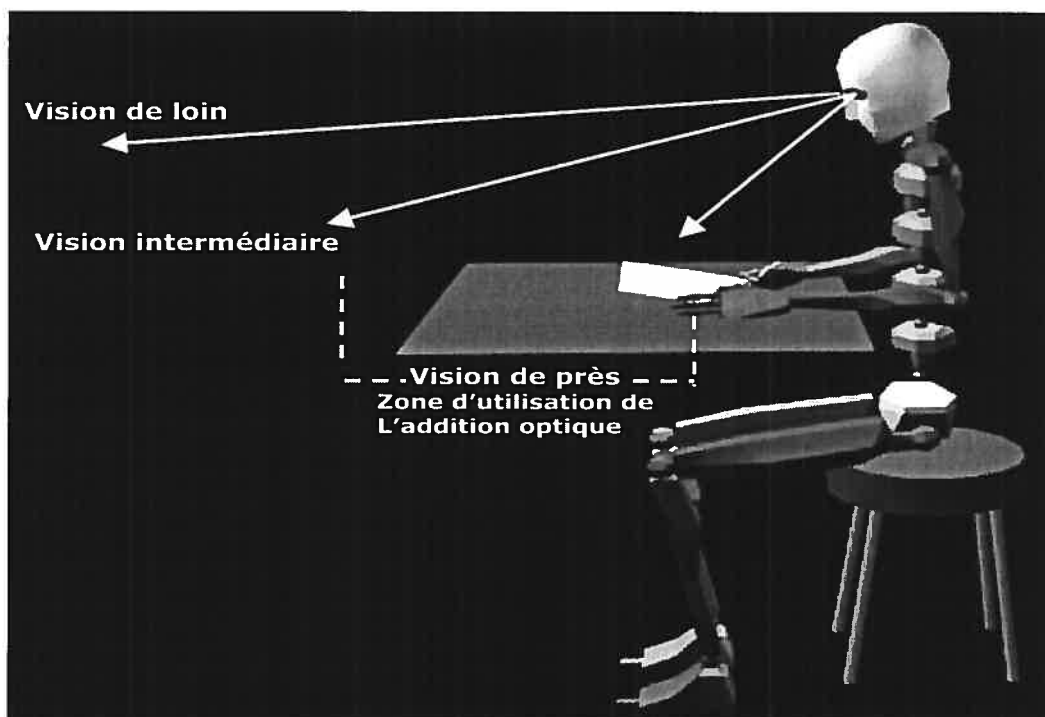
influencés par le vieillissement. En effet, le temps de réaction nécessaire à programmer les mouvements augmente avec l'âge. Aussi, il semble qu'avec l'âge le bruit au niveau moteur soit plus élevé. La conséquence directe de cela est une augmentation de la variabilité du mouvement. Ainsi, les personnes âgées ont tendance à réduire la vitesse de leur mouvement afin de maintenir la variabilité de leur première impulsion de mouvement à un niveau acceptable. Cependant, en plus d'ainsi diminuer leur vitesse de mouvement, les personnes âgées ont aussi tendance à réduire l'étendue de leur première impulsion de mouvement. Il en résulte ainsi un plus grand nombre de corrections produites lorsque la tâche exige d'être précis.

L'impact du vieillissement sur le système visuel et sur le système moteur augmente lorsque la tâche devient plus exigeante à un niveau perceptif ou moteur. Il est donc possible que ces conséquences du vieillissement soient impliquées dans les difficultés perceptivo-motrices rencontrées par certains presbytes lors du port de verres progressifs. En effet, la combinaison du vieillissement du système visuo-moteur et des biais optiques induits par les verres progressifs pourraient influencer la fiabilité des mécanismes de planification et de contrôle du mouvement et expliquer l'intolérance développée par certains porteurs de ces verres. Par exemple, les modulations de la première impulsion de mouvement retrouvées chez les jeunes adultes pourraient devenir moins efficaces avec le vieillissement.

En plus de ces considérations théoriques, l'intérêt clinique d'évaluer de vrais presbytes était important car une meilleure compréhension des mécanismes visuo-moteurs mis en place lors du port de verres progressifs chez de vrais presbytes pourrait permettre de donner de meilleures consignes aux utilisateurs dans les contextes pouvant

générer des problèmes. En effet, la complexité de ce type de verre nécessite une bonne adéquation entre la position de la tête, la direction du regard et la zone optique utilisée; et ceci en fonction de la distance à laquelle l'objet d'intérêt est situé (figure 1).

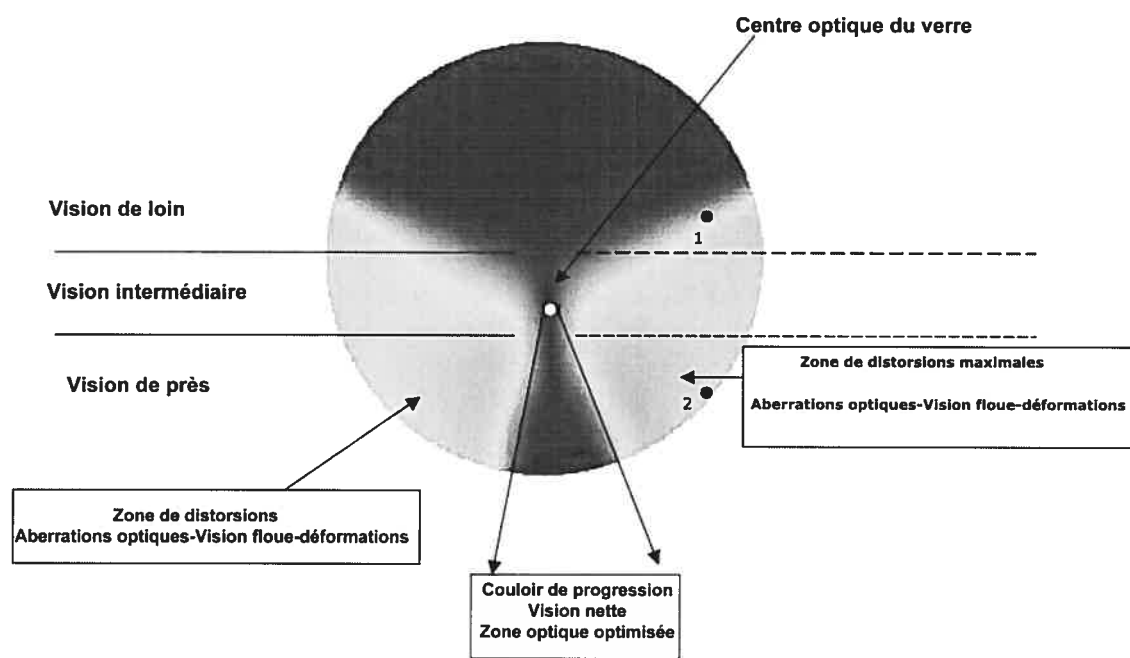
**Figure1** : représentation des trois zones de vision pouvant être affectées par le port de tête lorsque des verres progressifs sont portés.



Du fait de la structure du verre progressif, il est donc concevable que des biais perceptifs puissent être générés dans la prise d'information visuelle si l'adéquation entre la direction du regard et la zone de vision optimale du verre n'est pas respectée; i.e., lorsque la prise d'information se fait à l'extérieur des zones optiques optimisées (figure 2). Par exemple, des biais relatifs à la position d'une cible dans l'espace pourraient être induits si cette cible est localisée dans une zone optique située en dehors du couloir de progression; i.e., là où sont présentes distorsions et aberrations optiques (figure 2). Ceci

pourrait alors affecter la représentation interne de la position spatiale de la cible qui pourrait ne pas être compensée par les mécanismes de modulation du mouvement observé dans les premières expériences de cette thèse.

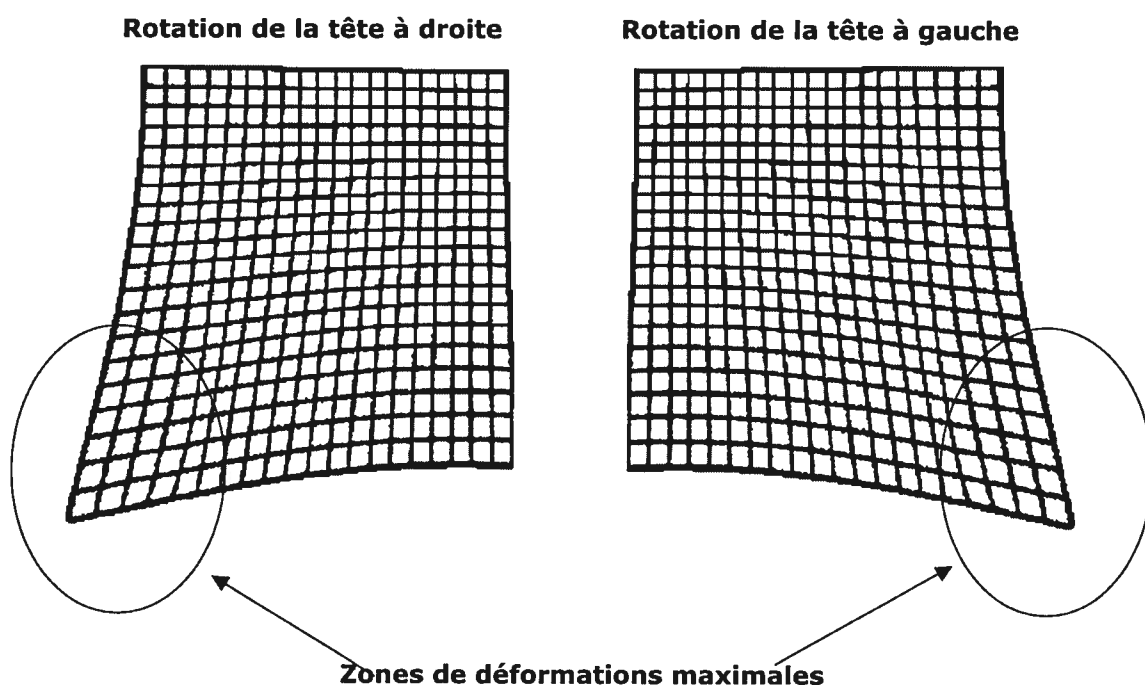
Figure 2 : Représentation d'un verre progressif et des différentes zones de vision, de distorsions et d'aberrations optiques. Le centre optique, le couloir de progression ainsi que les positions des deux cibles utilisées sont représentés



À la lumière de l'ensemble de ces données comportementales, optiques et physiologiques, nous avons décidé d'élaborer un protocole qui permettrait d'évaluer les mécanismes de planification et de contrôle du mouvement dans le contexte du vieillissement. De plus, nous avons utilisé un contexte considéré comme problématique en clinique. En effet, nous avons évalué des participants jeunes et âgés dans le cadre d'une tâche de pointage, en condition de vision-normale dans un protocole où une rotation de la tête était exigée lors du port de verres progressifs. La rotation de la tête

avait pour objectif de générer un effet de tangage (distorsion dynamique) produisant des déformations dynamiques au sein de la portion inféro-latérale du champ visuel controlatéral à la rotation de la tête (Figure 3).

Figure 3 : Représentation de la déformation d'une grille vue à travers des verres progressifs lors de rotations de la tête à droite ou à gauche. Les zones de distorsions maximales sont montrées dans les portions inféro-latérales



Ce protocole comprenait deux conditions expérimentales qui ont été réalisées en condition de vision-normale avec et sans progressifs. Nous avons décidé de conduire cette expérience en condition de vision-normale car dans les expériences 2 et 3 les participants jeunes arrivaient à moduler leur mouvement sur la base des informations visuelles dynamiques. Ainsi, dans la présente expérience nous avons voulu évaluer si les vrais utilisateurs de verres progressifs, les adultes vieillissant, arrivaient à produire le

même type de modulation qu'observé avec des participants jeunes. De plus, l'essentiel des situations où des plaintes cliniques ont été enregistrées étaient dans des conditions d'éclairage diurne, i.e., avec l'accès aux informations visuelles dynamiques. L'objectif spécifique de ce chapitre était de répondre aux questions suivantes. Du fait du contexte du vieillissement normal, est-ce que les mécanismes de planification/contrôle sont moins efficaces dans ce type de tâche pour les personnes âgées comparativement à ce que l'on peut observer chez les jeunes ? Suite aux biais induits par ces lunettes, obtient-on plus de corrections discrètes chez les personnes âgées que chez les jeunes, ce qui résulterait des mécanismes de modulation moins efficaces de la première impulsion de mouvement. Est-ce que les distorsions dynamiques pouvaient affecter les mécanismes de planification/contrôle observés chez les participants jeunes et âgés lors des protocoles avec distorsions statiques ? Si altération de mécanismes il y a, sont-ils plus importants chez les participants âgés ?

## Matériel, méthode et participants

### Participants

Le groupe de participants jeunes ( $n=10$ ) était constitué de personnes ayant pris part aux expériences 2 ou 3 mais n'ayant pas été exposées aux verres progressifs ou à la condition vision-normale. Il s'était écoulé six mois entre la participation de ces individus aux deux protocoles expérimentaux. Le groupe de participants âgés ( $n=10$ ) était constitué d'adultes de plus de 60 ans (moyenne d'âge = 68 ans), droitiers, sans maladie oculaire et sans problème moteur. Ces personnes n'avaient jamais porté de verres

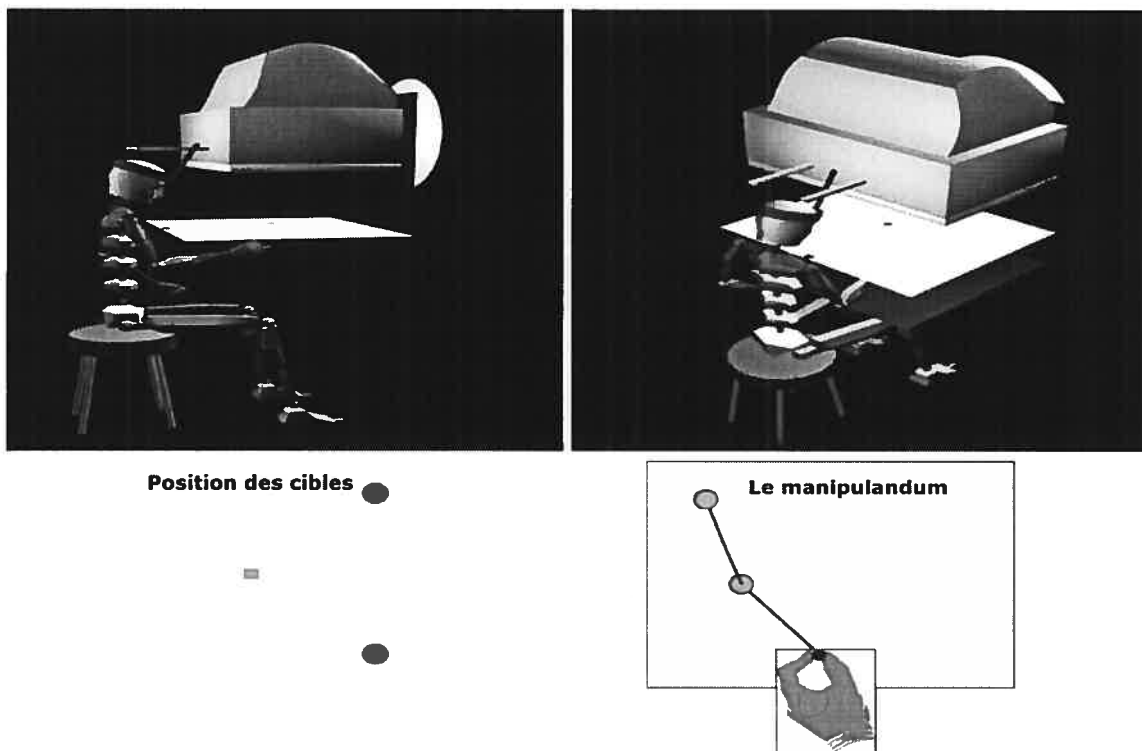


progressifs de leur vie. Ce groupe de personnes âgées a pris part à un bilan optométrique complet suivi d'une prescription de verres à foyers progressifs adaptés à leur vue.

#### Position de l'écran

La configuration expérimentale a été légèrement modifiée dans cette quatrième expérience. Pour produire une tâche un peu plus naturelle, l'écran fut basculé en position horizontale parallèlement à la surface de la table. L'écran pouvait être vu par les participants via un miroir positionné entre l'écran et la table. Ainsi, les participants ne pouvaient pas voir leur bras qui se déplaçait sous le miroir. Une telle configuration permettait aux participants de produire des mouvements dans le même plan que ce qui était vu à l'écran (figure 4). Avec cette configuration, les participants pouvaient appuyer la tête sur le rebord de l'écran alignée avec la base de départ.

**Figure 4** : Montage expérimental et position des cibles par rapport au champ visuel supérieur et inférieur



### Position des cibles

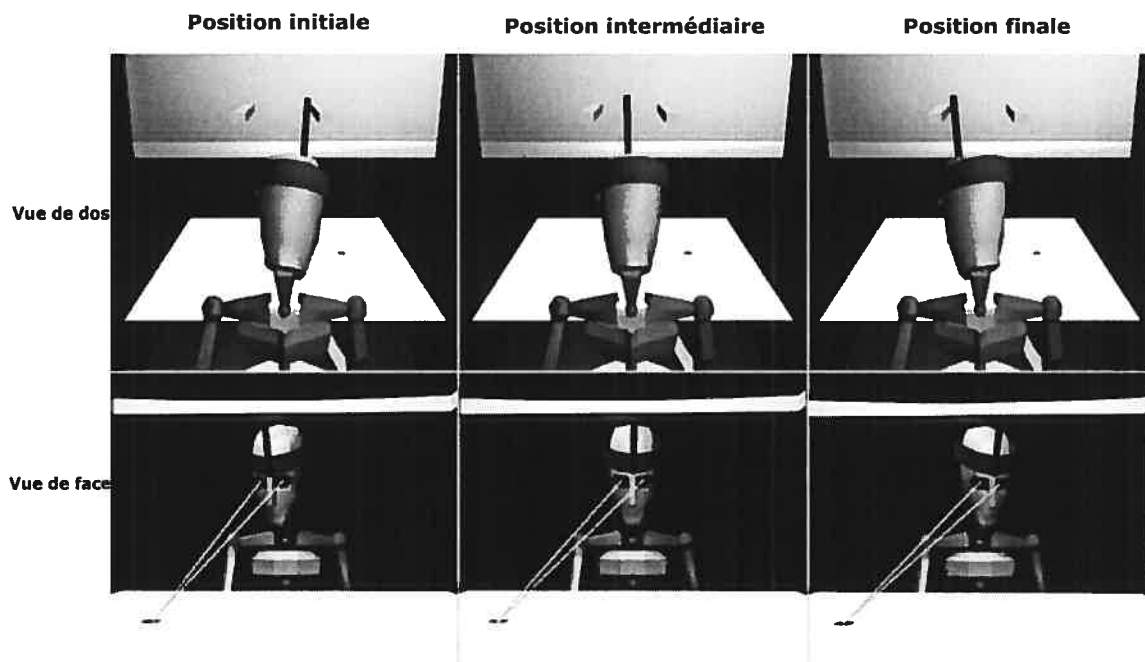
Afin d'éviter tout phénomène de fatigue au sein de notre groupe de personnes âgées nous avons limité le nombre d'essais à 170. Nous avons choisi de conserver les deux cibles latérales des expériences 2 et 3. La position de ces cibles a cependant été modifiée afin de préserver la vision binoculaire lors de la rotation de la tête. Les cibles avaient des coordonnées cartésiennes de 120 mm de la base de départ sur les axes sagittal et latéral et elles étaient vues à 50 cm (soit  $18.6^{\circ}$  de la base de départ au lieu  $21.6^{\circ}$  dans l'expérience 2). La position des cibles est illustrée à la figure 4.

## Conditions expérimentales et procédures

### Rotation de la tête

Dans cette expérience, les participants devaient effectuer des rotations de la tête. Cependant, les rotations de la tête devaient être contrôlées afin de conserver une localisation binoculaire des cibles à l'intérieur du champ optique d'intérêt (zones de distorsion). Afin de satisfaire ces critères expérimentaux, nous avons évalué préalablement quelle était l'amplitude maximale de rotation de la tête permettant de conserver une localisation binoculaire des cibles. À partir de la position primaire de la tête (tête droite alignée avec la base de départ), nous avons déterminé les limites au-delà desquelles les rotations de la tête ne devaient pas se faire; ceci à droite et à gauche de cette position primaire. À partir de cette évaluation, des bornes physiques ont été posées sur le rebord de l'écran (figure 5). Lors de l'expérience, les participants devaient porter un casque dont la partie frontale était équipée d'une tige rigide servant de tuteur. Les participants devaient appuyer cette tige contre le rebord de l'écran entre deux bornes qui limitaient ainsi l'amplitude des rotations vers la droite et vers la gauche. Il était stipulé aux participants qu'ils devaient effectuer des rotations de la tête et non des mouvements de translation.

**Figure 5:** Représentation de la direction du regard lors des rotations de la tête. Représentation d'un participant vue de dos lors d'une rotation de la tête et des bornes restreignant la rotation de la tête



#### Conditions expérimentales

Deux conditions expérimentales étaient proposées dans cette expérience. Chaque condition était réalisée avec et sans verres progressifs. La première condition appelée condition statique exigeait que la position de la tête reste fixe et alignée avec la base de départ comme dans l'expérience 2. Les participants portaient le casque dont le tuteur était maintenu aligné avec la base de départ. La localisation de la cible se faisait de manière fovéale suite à une saccade visuelle puis le mouvement de pointage pouvait être exécuté.

La deuxième condition appelée condition dynamique exigeait que le tuteur fixé au casque soit d'abord appuyé sur la borne située à droite. Dans cette position, le participant avait la tête légèrement tournée vers la droite vers la portion de l'espace où

les cibles étaient présentées. Le participant devait fovéaliser la cible à son apparition, puis en gardant la fixation fovéale de la cible devait effectuer une rotation de la tête vers la gauche synchronisée avec un mouvement de pointage manuel vers la cible. Cette procédure a été utilisée afin de générer du mouvement au sein de la scène visuelle et provoquer des distorsions dynamiques (i.e., effet de tangage) lors du port des verres progressifs; la rotation de la tête était de  $25.6^{\circ}$ .

Chaque condition expérimentale (statique et dynamique) était conduite avec et sans verres progressifs. L'ordre des conditions perceptives était contrebalancé entre chaque participant. Pour chaque condition, les participants effectuaient d'abord 10 essais de familiarisation afin de bien synchroniser la rotation de la tête et le mouvement de pointage. Puis, pour chaque condition expérimentale, les participants effectuaient 40 essais avec lunettes et 40 essais sans lunettes. L'ordre des conditions expérimentales (statique/dynamique) et des conditions perceptives (avec et sans lunettes) était contrebalancé entre les participants.

Toute l'expérience a été réalisée en condition de vision normale et la connaissance du résultat était donnée après chaque essai. Afin d'éviter la mise en place de compromis vitesse-précision différents en fonction des conditions expérimentales de l'étude, les participants devaient effectuer leur mouvement dans une fenêtre temporelle comprise entre 400 ms et 600 ms.

### Analyses

Nous avons d'abord comparé le groupe jeune au groupe de presbytes âgés afin d'évaluer si le vieillissement et/ou l'induction de mouvement au sein de la scène visuelle

pouvaient affecter la performance motrice. Une analyse préalable et plus globale n'ayant pas montré de tendance particulière au sein des résultats, nous avons choisi de focaliser nos analyses sur les huit premiers essais exécutés pour lesquels la probabilité d'observer des effets était plus élevée. Nous avons donc procédé à des analyses sur le premier bloc d'essais de chaque condition perceptive (huit premiers essais). Les effets principaux ainsi que les interactions ont été analysés, décomposés et ajustés selon la même procédure que dans les autres chapitres. Dans un souci de clarté, les variables utilisées ont été définies au début de chaque section de résultat ainsi que l'objectif de leur utilisation et les analyses statistiques utilisées.

## Résultats

### Condition statique

Lors de nos analyses préliminaires nous avons observé qu'un participant du groupe âgé avait produit trois fois plus de corrections comparativement aux autres participants qui produisaient en moyenne 10 corrections sur l'ensemble de l'expérience. De plus, les corrections produites par ce participant se mettaient en place autant dans les phases avec et sans lunettes des conditions statique et dynamique. Comme la stratégie de ce participant semblait assez différente de celles des autres participants, nous ne l'avons pas inclus dans nos analyses que ce soit pour la condition statique ou dynamique.

Les données relatives au nombre de corrections produites ont révélé que 3.75 % des essais des participants âgés et 1.75 % des essais des participants jeunes présentaient des corrections discrètes. Ces essais corrigés n'ont pas été pris en compte dans nos analyses.

L'objectif était dans un premier temps d'évaluer si les mécanismes de contrôle observés lors de l'expérience 2, où la cible était fovéalisée, étaient reproduits au sein du groupe jeune. Dans un second temps, nous voulions évaluer si l'on observait des mécanismes identiques chez des participants âgés. Plus spécifiquement, nous avons voulu évaluer si les biais induits par les verres progressifs affectaient la précision/variabilité du mouvement ou menait à une stratégie de contrôle différente pour nos participants âgés. Nous avons donc calculé lors de chaque condition perceptive, les biais (erreur constante sagittale et latérale), la variabilité (erreur variable sagittale et latérale) et le temps de mouvement pour la condition expérimentale statique. Nous avons soumis individuellement ces données à une ANOVA contrastant 2 groupes expérimentaux (jeune et âgé) x 2 conditions perceptives (avec lunettes et sans lunettes) x 2 positions de cible (supérieure-latérale; inférieure-latérale) avec des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

Les résultats des ANOVAs calculées sur la précision spatiale n'ont révélé aucun effet principal ou d'interaction significatif impliquant les groupes expérimentaux ou la condition perceptive ( $p_s > .15$ ); les valeurs moyennes pour les biais et la variabilité sont consignés au tableau 1-a. L'ANOVA calculée sur le temps de mouvement révéla un effet principal de position de cible,  $F(1, 17) = 85.5$ , montrant des temps de mouvement significativement plus longs pour la cible inférieure (454.3 ms) comparativement à la cible supérieure (421.9 ms). Les données montrent également que les temps de mouvement étaient plus longs pour les personnes âgées comparativement aux jeunes mais la différence observée n'atteignait pas des valeurs significatives (voir tableau 1a).

Tableau 1a :statique

Cibles	Avec lunettes		Sans lunettes	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés
	Erreur constante latérale			
Supérieure latérale	-1.19	-1.06	-1.69	-1.26
Inférieure latérale	-0.97	-1.94	-0.68	-1.00
	Erreur variable latérale			
Supérieure latérale	3.62	3.88	3.32	3.36
Inférieure latérale	3.50	3.50	2.77	3.04
	Erreur constante sagittale			
Supérieure latérale	-2.26	-0.57	-2.38	-1.17
Inférieure latérale	-1.10	-0.79	-2.90	-2.11
	Erreur variable sagittale			
Supérieure latérale	2.83	3.09	2.52	3.11
Inférieure latérale	3.56	3.66	3.04	3.23
	Temps de mouvement (ms)			
Supérieure latérale	415.1	421.02	417.2	434.38
Inférieure latérale	441.1	461.51	442.1	472.47

Les résultats de précision spatiale et de temps de mouvement ne montrant aucune différence entre les groupes, nous avons voulu évaluer si la performance des participants jeunes et âgés se différenciait au niveau de la planification et/ou du contrôle du mouvement. Nous avons donc calculé où (longueur et orientation du vecteur de mouvement) et quand (occurrence temporelle) se produisait chaque marqueur



cinématique pour les deux cibles. Nous avons également calculé les coefficients de variabilité sur la composante étendue du mouvement car dans les expériences précédentes, c'est sur cette composante que les verres progressifs avaient eu un impact. Nous avons ensuite soumis individuellement ces données spatiales et temporelles ainsi que les coefficients de variabilité à une ANOVA contrastant 2 groupes expérimentaux (jeune et âgé) x 2 conditions perceptives (avec lunettes et sans lunettes) x 2 positions de cible (supérieure-latérale; inférieure-latérale) x 4 marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération, position terminale) avec des mesures répétées pour les trois derniers facteurs.

L'ANOVA calculée sur la longueur du vecteur de mouvement révéla une interaction significative groupe expérimental x marqueur cinématique x position de cible,  $F(3, 51) = 6.0$ . La décomposition de cette interaction montrait que chaque marqueur cinématique se manifestait significativement plus loin de la base de départ par rapport au marqueur qui le précédait. Pour la cible inférieure, l'interaction a montré que du pic d'accélération au pic de décélération, la longueur des vecteurs respectifs était significativement plus grande pour le groupe jeune (accélération = 15.7 mm; vitesse = 84.9 mm et décélération = 154.7 mm) que pour le groupe âgé (accélération = 10.6 mm; vitesse = 74.9 mm et décélération = 147.4 mm). Aucune différence significative ne fut enregistrée entre les deux groupes pour l'occurrence spatiale des marqueurs de la cible supérieure. Finalement, cette interaction montra au sein du groupe jeune que l'occurrence spatiale des marqueurs cinématiques se produisait significativement plus loin pour la cible inférieure que pour la cible supérieure; ceci était vrai au pic d'accélération (15.7 mm vs. 7.7 mm), au pic de vitesse (84.9 mm vs. 74.6 mm) et au

pic de décélération (154.7 mm vs. 150.5 mm); voir les tableaux 2a et 2b dans la section annexes.

L'ANOVA calculée sur l'orientation du vecteur ne montra aucun effet principal ou d'interaction significatif ( $p_s > .15$ ) impliquant les groupes expérimentaux ou le port ou non des verres progressifs.

L'ANOVA calculée sur les variables temporelles a montré une interaction significative groupe expérimental x marqueur cinématique x position de cible,  $F(3, 51) = 7.3$ . La décomposition de cette interaction a montré que chaque marqueur se manifestait plus tard dans le temps comparativement à celui qui le précédait et qu'indifféremment du groupe expérimental les marqueurs cinématiques arrivaient significativement plus tard dans le temps pour la cible inférieure que pour la cible supérieure. L'interaction résultait du fait qu'au sein du groupe âgé (466.9 ms) le temps de mouvement était significativement plus long pour la cible inférieure comparativement aux résultats obtenus au sein du groupe jeune (441.6 ms). Aucune différence ne fut enregistrée entre les deux groupes expérimentaux aux autres marqueurs cinématique et pour la cible supérieure (voir les tableaux 2a et 2b dans la section annexes).

L'ANOVA calculée sur le coefficient de variabilité ne révéla qu'un effet principal de marqueur cinématique,  $F(3, 51) = 217.2$ , qui montrait une diminution significative du coefficient entre le pic d'accélération et le pic de vitesse et entre le pic de décélération et la fin du mouvement. Les données montraient également que du pic

d'accélération au pic de décélération, la variabilité du mouvement était plus grande pour les personnes âgées que pour les jeunes mais ceci sans atteindre un niveau significatif.

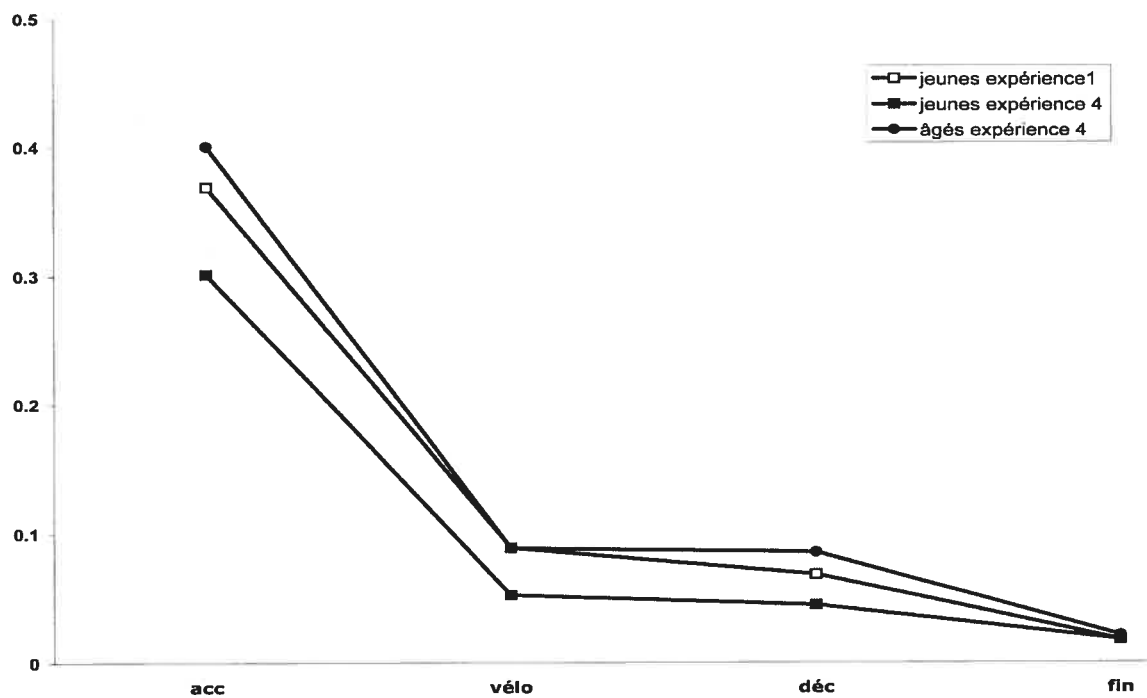
Les résultats de cette première section suggèrent des mécanismes de planification/contrôle similaires chez les participants jeunes et chez les participants presbytes âgés (voir en annexe B tableaux récapitulatifs 2-a et b). On observait également que les adultes âgés avaient des impulsions plus courtes jusqu'au pic de décélération ce qui leur faisait couvrir plus de distance entre le pic de décélération et la fin du mouvement. Ceci expliquerait leurs plus longs temps de mouvement et indique également que les participants âgés modulaient de manière plus importante leur mouvement en fin de trajectoire, ce qui est montré par les coefficients de variabilité. Cette plus grande variabilité observée pour des mouvements plus courts au sein du groupe de participants âgés suggère également que le bruit neuro-moteur augmente lors du vieillissement

Cette première section de résultats n'a révélé aucune différence quant à la précision spatiale entre les participants jeunes et âgés (tableau 1a). Concernant la modulation du mouvement, les données montraient une modulation de la variabilité du mouvement plus prononcée chez les participants plus âgés. Cette plus grande modulation observée en fin de mouvement chez les plus âgés fait en sorte qu'il n'est pas étonnant que ceux-ci aie pu s'ajuster aussi rapidement que les plus jeunes aux biais induits par les verres progressifs.

Il faut aussi noter que la modulation observée pour la condition statique de l'expérience 4 semblait similaire à celle obtenue dans l'expérience 2 où la cible était aussi fovéalisée (Figure 6). Pris ensemble, tous ces résultats montrent qu'en présence

d'un environnement perceptif variable généré par des verres progressifs, le système visuo-moteur était capable de moduler en temps réel la première impulsion de mouvement. De plus, ces mécanismes semblent se maintenir lors du vieillissement. Finalement, les résultats des expériences 2 et 4 montrent des mécanismes de planification et de contrôle hautement efficaces puisqu'ils permettaient aux participants de terminer sur la cible avec un biais et une variabilité minimale, et ce, dès le premier bloc de pratique.

**Figure 6** Coefficient de variabilité aux différents marqueurs cinématiques obtenus pour les participants jeunes de l'expérience 2 et 4 ainsi que pour les personnes âgées de l'expérience



### Condition dynamique (condition avec rotation de la tête)

Les données relatives au nombre de corrections produites ont révélé que 6,8 % des essais des participants âgés et 2 % des essais des participants jeunes présentaient des corrections discrètes. Cependant, pour les participants âgés la proportion de correction discrète était similaire dans la condition statique et la condition dynamique. De plus, à l'intérieur de ces deux phases expérimentales, le nombre de corrections discrètes n'était pas influencé par le port des verres progressifs. Il apparaît donc que le pourcentage de corrections observé chez les participants âgés soit plus le fait du vieillissement que des procédures expérimentales relatives à nos questions d'intérêt. Comme dans la condition statique, ces essais corrigés n'ont pas été pris en compte dans les analyses qui suivent.

Dans cette section, l'objectif était d'évaluer si les participants jeunes et âgés compensaient de la même manière les distorsions dynamiques générées par la combinaison de rotation de la tête et du port de verres progressifs. Nous voulions déterminer si les stratégies de contrôle étaient différentes au sein des deux groupes lors de telles conditions perceptives ou si les résultats obtenus lors de la condition statique persistaient. Les résultats d'une telle évaluation pouvaient, dans un second temps, aider à mieux comprendre les difficultés perceptivo-motrices rencontrées par de vrais presbytes nouveaux porteurs de verres progressifs confrontés à un environnement perceptif altéré. Pour cela nous avons calculé les biais (erreur constante sagittale et latérale), la variabilité (erreur variable sagittale et latérale) et le temps de mouvement pour cette condition expérimentale dynamique. Nous avons soumis individuellement ces données à

une ANOVA contrastant 2 groupes expérimentaux (jeune et âgé) x 2 conditions perceptives (avec lunettes et sans lunettes) x 2 positions de cible (supérieure-latérale; inférieure-latérale) avec des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

Tel qu'obtenu dans la condition statique, les ANOVAs calculées sur les biais et la variabilité n'ont révélé aucun effet principal ou d'interaction significatif impliquant le groupe expérimental ou la condition perceptive ( $p > .15$ ); les valeurs moyennes sont reportées dans le tableau 1b.

L'ANOVA calculée sur le temps de mouvement révéla un effet principal significatif de position de cible,  $F(1, 17) = 36.26$ , qui montrait des temps de mouvement significativement plus longs pour la cible inférieure (moyenne de 483.31 ms) comparativement à la cible supérieure (moyenne de 454.2 ms). Les données montraient également des temps de mouvement plus longs pour les personnes âgées comparativement aux jeunes mais ces différences n'étaient pas significatives (voir tableau 1b).

L'ensemble de ces données de précision spatiale et de temps de mouvement ne révéla aucun impact de l'âge et de la condition perceptive sur la précision/variabilité du mouvement. On remarqua cependant, des temps de mouvement significativement plus longs au sein du groupe de participants âgés pour la cible inférieure.

Tableau 1b : condition dynamique

Cibles	Avec lunettes		Sans lunettes	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés
	Erreur constante latérale			
Supérieure latérale	-1.97	-0.30	-1.70	-1.05
Inférieure latérale	0.81	-0.03	-0.60	-0.62
	Erreur variable latérale			
Supérieure latérale	4.20	4.63	3.21	3.00
Inférieure latérale	3.66	4.35	2.53	3.38
	Erreur constante sagittale			
Supérieure latérale	-2.15	-1.08	-2.09	-1.26
Inférieure latérale	-1.69	-1.08	-2.57	-2.44
	Erreur variable sagittale			
Supérieure latérale	3.11	4.58	3.00	3.57
Inférieure latérale	3.77	3.86	2.72	3.02
	Temps de mouvement (ms)			
Supérieure latérale	442.8	460.8	437.2	476.0
Inférieure latérale	466.2	506.0	455.6	505.5

Nous avons ensuite voulu déterminer si l'effet de tangage théoriquement induit par notre procédure expérimentale influençait les processus de planification/contrôle du mouvement. De plus, nos groupes expérimentaux nous permettaient d'évaluer si le vieillissement pouvait influencer les potentielles modifications des mécanismes de planification/contrôle mis en place. Nous avons alors calculé où (longueur et orientation du vecteur de mouvement) et quand (occurrence temporelle) se produisait chaque marqueur cinématique pour les deux positions de cible; nous avons également calculé

les coefficients de variabilité sur la composante étendue du mouvement et ceci sur le même principe qui a été utilisé dans la condition statique. L'ensemble de ces données spatiales et temporelles ainsi que les coefficients de variabilité a été soumis à une ANOVA contrastant 2 groupes expérimentaux (jeune et âgé) x 2 conditions perceptives (avec lunettes et sans lunettes) x 2 positions de cible (supérieure-latérale; inférieure-latérale) x 4 marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération, position terminale) avec des mesures répétées pour les trois derniers facteurs.

L'ANOVA calculée sur la longueur des vecteurs à chaque marqueur cinématique a révélé une interaction significative marqueur cinématique x position de cible,  $F(3, 51) = 5.0$ . La décomposition de cette interaction montra que chaque marqueur cinématique se manifestait significativement plus loin de la base de départ que le marqueur qui le précédait et que l'occurrence des pics d'accélération et de vitesse se produisait significativement plus près de la base de départ pour la cible supérieure (7.8 et 80.21 mm, respectivement) comparativement à la cible inférieure (14.9 et 85.2 mm, respectivement); voir les tableaux 3a et 3b dans la section annexes.

L'ANOVA calculée sur l'orientation de vecteur ne révéla aucun effet principal ou d'interaction significatif impliquant les groupes expérimentaux ou la condition perceptive ( $p > .15$ ).

L'ANOVA calculée sur les données temporelles a révélé une interaction significative groupe expérimental x marqueur cinématique x position de cible,  $F(3, 57) = 6.6$ . La décomposition de cette interaction a montré que chaque marqueur cinématique se manifestait significativement plus tard que celui qui le précédait et qu'indifféremment du groupe expérimental les marqueurs arrivaient significativement plus tard dans le



temps pour la cible inférieure que pour la cible supérieure. L'interaction résultait du fait qu'au sein du groupe âgé (468.4 ms et 505.4 ms, respectivement) le temps de mouvement était significativement plus long pour les deux positions de cible comparativement aux résultats obtenus au sein du groupe jeune (440.2 ms et 460.9 ms, respectivement). Les données relatives à l'occurrence temporelle des différents marqueurs cinématiques montraient de plus que les personnes âgées ne prenaient pas plus de temps entre le pic de décélération et la fin du mouvement. Ils prenaient simplement plus de temps à effectuer leur mouvement (voir les tableaux 3a et 3b dans la section annexes).

L'ANOVA calculée sur le coefficient de variabilité révéla un effet principal de marqueur cinématique x position de cible,  $F(3, 51) = 115$ . Cet effet principal montrait une diminution significative de la variabilité du pic d'accélération (0.4) au pic de vitesse (0.07) suivit d'une stabilisation jusqu'au pic de décélération (0.06). Finalement, les données montraient une chute significative de la variabilité entre le pic de décélération et la fin du mouvement (0.02); voir les tableaux 3a et 3b dans la section annexes.

## Résumé

Les résultats de la condition expérimentale dynamique ont montré que le couplage verres progressifs et rotation de la tête n'avait pas d'impact sur la précision spatiale du mouvement et n'entraînait aucune différence dans les mécanismes de planification et de modulation utilisés par les participants jeunes et âgés (voir tableaux

récapitulatifs, 3a et b dans l'annexe B). Lors de la condition statique il y avait une interaction groupe expérimental x marqueur cinématique x position de cible qui n'a pas été retrouvée pour la condition dynamique. Cependant, les mêmes tendances étaient observées dans les deux expériences. Le fait de ne pas avoir obtenu de différence liée au groupe dans la condition dynamique était dû au fait qu'il y avait plus de variance que lors de la condition statique.

D'une manière plus générale, les données des conditions statique et dynamique montrent que les personnes âgées et les participants plus jeunes ont des mécanismes de planification et de contrôle similaires, capables de compenser les distorsions générées par les verres progressifs et ceci même en présence d'une distorsion dynamique. Plus spécifiquement, les résultats des coefficients de variabilité et de précision spatiale montrent que les performances obtenues résultent largement de mécanismes très efficaces de modulation de la première impulsion de mouvement. De plus, la modulation observée entre le pic de décélération et la fin du mouvement était plus prononcée pour les participants âgés que pour les jeunes.

#### Planification de la première impulsion et distorsions optiques dynamiques

Les données relatives à l'occurrence spatiale des pics d'accélération et de vitesse des deux groupes montrent qu'indépendamment de la condition expérimentale (statique ou dynamique) ou de la condition perceptive (avec ou sans lunettes) la planification du mouvement n'est pas affectée. Ceci suggère que les biais potentiellement induits par les verres progressifs n'ont pas pris place ou sont trop petits pour influencer la planification (voir en annexe B les tableaux 2a, 2b, 3a et 3b). De plus,

une analyse supplémentaire de chaque premier essai des différentes phases ne montrait par de tendance caractérisant la mise en place d'une modification du plan moteur initial sur la base de la CR visuelle.

#### Modulation de la première impulsion et distorsions optiques dynamiques

Les données cinématiques relatives à l'occurrence spatiale et temporelle du pic de vitesse à la fin du mouvement ne montrent pas de différence entre les groupes pour la cible supérieure et ceci quelle que soit la condition expérimentale (statique ou dynamique) ou perceptive (avec ou sans lunettes). Par contre, comparativement au groupe jeune, on remarque au sein du groupe âgé une impulsion de mouvement plus courte et des temps de mouvement plus longs pour les mouvements dirigés vers la cible inférieure. Ceci suggère que pour cette cible les participants âgés avaient besoin de plus d'espace et de temps pour contrôler leur mouvement ou plus probablement étaient plus sujets aux effets de l'inertie. Concernant les coefficients de variabilité, on observa pour toute cette expérience un comportement similaire pour les deux groupes, les données montraient une diminution significative de la variabilité du pic d'accélération au pic de vitesse et aussi entre le pic de décélération et la fin du mouvement. Notons toutefois, que les niveaux de variabilité avaient tendance à être plus élevés pour les participants âgés (ensemble de données résumées en annexe B dans les tableaux 2a et b; 3a et b).

Ces résultats et les résultats de précision spatiale ont montré qu'en présence de verres progressifs générant des distorsions perceptives statiques et dynamiques (lors de rotation de la tête), la précision/variabilité terminale des mouvements est assurée. Ceci était dû au moins en partie aux mécanismes de contrôle permettant de moduler en temps réel la première impulsion de mouvement. Ces mécanismes permettaient de réduire la

variabilité initiale présente au sein du mouvement et assurer ainsi la précision spatiale de celui-ci. D'ailleurs, les profils obtenus dans notre expérience reproduisent d'autres résultats obtenus également lors de tâches contraintes de manière temporelle. En effet, Proteau et ses collaborateurs ont décrit des profils identiques pour des coefficients de variabilité relatifs à l'étendue du mouvement (Lhuisset & Proteau, 2004; Bédard & Proteau, 2005; Robin et al., 2005). Dans leurs études, ces auteurs décrivaient une diminution rapide de la variabilité entre le pic d'accélération et le pic de vitesse. Cette diminution significative de la variabilité était suivie d'une stabilisation jusqu'au pic de décélération. Il suivait une chute significative de la variabilité entre le pic de décélération et la fin du mouvement; ce que nous avons également observé.

La première chute de variabilité observée a été attribuée par ces auteurs à la variabilité inhérente aux mécanismes de planification et serait un moyen pour le système visuo-moteur de réduire certaines incertitudes spatiales sur la base d'information plus fiable provenant de la réponse motrice en cours d'exécution. Suite à cette mise à jour, le plateau de variabilité observé entre le pic de vitesse et le pic de décélération pouvait indiquer que durant cette phase il y a extraction d'informations optimales (de nature phasique plutôt que tonique) permettant la réduction de variabilité observée en fin de mouvement.. Ce mode de contrôle de l'étendue du mouvement serait assez robuste pour compenser un ajout de biais comme c'est le cas lors du port de verres progressifs où lors d'altération dynamique de certains éléments spatiaux de la scène visuelle (effet de tangage). Finalement, il semble que pour le type de tâche utilisé, les processus mis en jeu ne sont pas affectés par le vieillissement normal.

### Mécanismes de contrôle, seuil de variabilité et changements spatiaux

Un des objectifs de nos différentes expériences était d'évaluer l'impact de l'induction de conflits subtils entre la vision et la proprioception sur la planification/contrôle du mouvement. L'absence d'effets consécutifs pour la condition de vision-normale au sein de nos résultats a montré qu'il n'y avait pas de mise en place d'adaptation visuo-motrice reflétant la mise en place d'un nouveau modèle interne). Toute adaptation visuo-motrice correspond à un apprentissage ou re-calibrage permettant de compenser des contraintes perceptivo-motrices allant au-delà des capacités de compensation des mécanismes normaux de planification/contrôle du mouvement (pour une revue voir, Redding, Rossetti, & Wallace, 2005). L'absence de telles adaptations dans nos résultats suggère que la planification des mouvements n'était pas affectée soit parce que le biais induit n'était pas perçu, soit par ce que celui-ci était trop petit pour être pris en compte lors de la planification. De plus, cette absence d'adaptation visuo-motrice peut également suggérer que les déplacements spatiaux induits par les verres progressifs s'inscrivent à l'intérieur d'une fenêtre de distorsion facilement compensable par les mécanismes classiques de contrôle du mouvement impliqués lors d'une tâche de pointage vidéo à deux dimensions. Ainsi, les déplacements spatiaux pouvant survenir lors de l'utilisation de verres progressifs seraient rapidement pris en charge par le système visuo-moteur afin d'ajuster la cinématique du mouvement et assurer la précision finale.

Dans cette optique, nous avons voulu évaluer les mécanismes de planification et de contrôle du mouvement lorsque des déplacements de cibles étaient induits à l'insu du

sujet pour des mouvements bien appris, tel que cela peut se produire lors du port de verres progressifs.

### Expérience 5

Pour simuler l'effet des déplacements perceptifs induits par les verres progressifs au sein de la scène visuelle, nous avons utilisé un protocole où la position des cibles situées dans la portion inférieure de l'espace de travail était changée entre les essais à l'insu des participants, tel que cela peut arriver lorsque d'un instant à un autre une cible est regardée dans deux zones optiques différentes du verre progressif. L'objectif de cette expérience était d'évaluer si les petits biais induits par les verres progressifs pouvaient ne pas affecter la planification du mouvement parce que trop ténus pour être complètement pris en charge par les mécanismes de contrôle en temps réel.

En effet, nous savons que les verres progressifs déplacent en théorie la position spatiale d'un objet regardé dans les zones de distorsions maximales. Or, les résultats des expériences 2 et 3 montrent un effet des verres progressifs sur la planification et la précision terminale uniquement dans la condition cible-seule. En effet, on observait des effets consécutifs lors des post-tests suite au port des verres progressifs uniquement lorsque les participants n'avaient pas la vision dynamique de leur mouvement. Vu qu'aucun impact n'avait été révélé sur la planification du mouvement en présence des afférences visuelles dynamiques, il était alors important d'évaluer dans un contexte simulant l'effet des verres progressifs, si la stratégie reposait sur une plus grande latitude dans l'élaboration de la commande motrice initiale en condition de vision normale du fait de l'efficacité des mécanismes de modulation en temps réel. Cette dernière

alternative, expliquerait le peu d'effet négatif associé au port des verres progressifs obtenu pour une tâche de pointage en condition de vision.

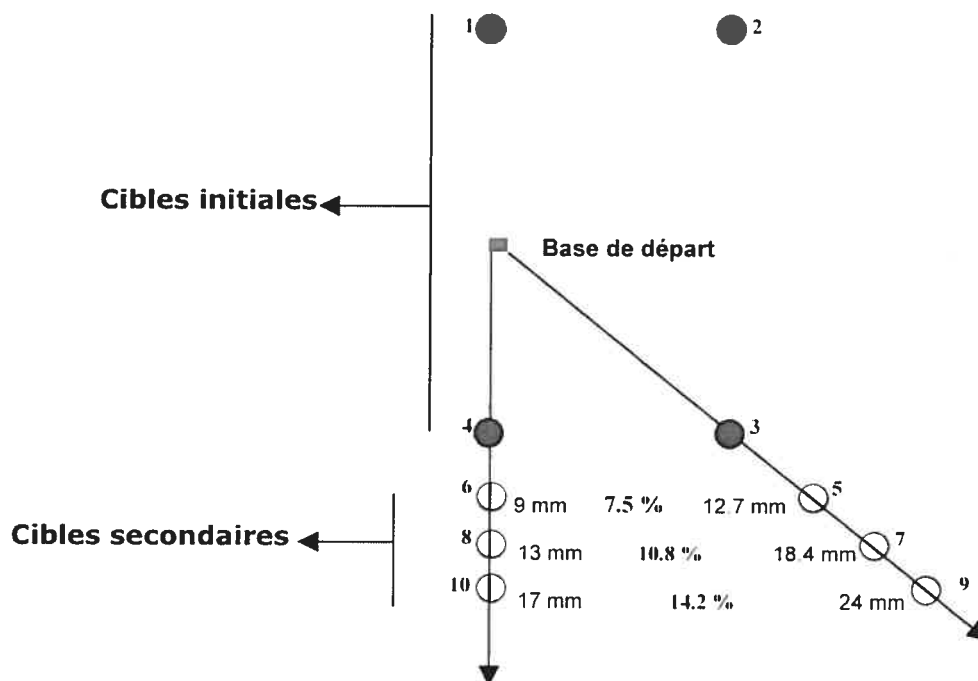
### Matériel et Méthode

Quarante participants ont pris part à cette expérience. Ils ont été répartis en quatre groupes. Le montage était strictement le même qu'utilisé à l'expérience 4 à l'exception que les participants ne portaient ni casque, ni lunettes.

#### Positions de cible

Nous avons utilisé quatre positions de cible. L'agencement de ces cibles était similaire à celui utilisé dans les expériences 2 et 3. Deux cibles étaient positionnées dans le champ visuel supérieur et deux dans le champ visuel inférieur; les deux cibles axiales étaient sur le même axe que la base de départ. Ces différentes cibles étaient respectivement à  $18.7^{\circ}$  (cibles latérales positionnées à 16.9 cm de la base de départ et vues à 50 cm) et à  $13.5^{\circ}$  (cibles axiales positionnées à 12 cm de la base de départ et vues à 50 cm) de la base de départ. Ces quatre cibles ont été identifiées comme étant les positions initiales des cibles. Lors de la phase de transfert (voir ci-bas), trois positions secondaires ont été ajoutées (25% des essais) pour les deux cibles inférieures. Les positions des cibles initiales et des cibles secondaires sont illustrées à la figure 7 .

**Figure 7** : Représentation des quatre positions de cible initiales et de la base de départ. Les positions des cibles secondaires correspondant aux perturbations de 7.5 %, 10.8 % et 14.2 % sont également représentées



### Phases expérimentales

Lors d'une phase d'acquisition, les participants devaient effectuer des mouvements de pointage vers l'une des quatre positions de cible (axiale-supérieure; latérale-supérieure; latérale-inférieure; axiale-inférieure). Il y avait le même nombre d'essais dirigés aléatoirement vers chacune des cibles. À partir du 81<sup>ème</sup> essai et ceci pour les 20 derniers essais de la phase d'acquisition, les participants devaient mentionner après chaque essai, s'ils avaient perçu une différence de position de cible par rapport aux positions auxquelles ils avaient été confrontés depuis le début de cette phase (jugement perceptif). Aucune perturbation n'était cependant introduite à ce stade du protocole.



Cette procédure avait pour objectif d'identifier si des participants détecteraient de façon induite de faux-positif (essais perçus perturbés alors qu'ils ne le sont pas).

Les participants réalisaient ensuite une phase de transfert composée de 120 essais. Les participants devaient effectuer leur mouvement et ensuite juger perceptivement si la position de cible était différente de celle utilisée durant la phase d'acquisition. Durant cette phase de transfert, 25 % des essais dirigés vers les cibles inférieures étaient perturbés en ce sens qu'ils devaient être dirigés vers les positions secondaires de ces cibles. Au total, 30 essais étaient effectués vers les cibles secondaires, soit 5 essais dirigés vers chacune de ces cibles. Tel qu'illustré à la figure 7, ces cibles secondaires étaient situées à 9, 13, et 17 mm de la cible primaire axiale, et 12.7, 18.4 et 24 mm de la cible primaire latérale.

#### Groupes expérimentaux

Deux groupes de jeunes adultes ont effectué la tâche en fovéalisant la cible (i.e., comme à l'expérience 2); un des groupes faisait la tâche en condition de vision normale et l'autre en condition cible-seule. Deux autres groupes effectuèrent la tâche avec une localisation périphérique de la cible (i.e., comme dans l'expérience 3); un des groupes en condition de vision normale et l'autre en condition cible-seule. La connaissance du résultat était donnée après chaque essai.

#### Analyses

Afin de pouvoir comparer les données des essais correspondant aux positions de cibles initiales à celles des essais perturbés, les calculs effectués en fin d'acquisition et en transfert ont été conduits sur les cinq derniers essais des positions initiales de cible. Ce

qui correspondait au nombre d'essais de chaque type de cibles secondaires présentées lors de la phase de transfert.

## Résultats

Pour évaluer si les essais perturbés ont affecté la performance des mouvements dirigés vers les cibles initiales nous avons analysé différentes variables dépendantes lors de la phase d'acquisition et lors de la phase de transfert. Au début de chaque sous-section de résultats nous avons défini les variables d'intérêt, le rationnel justifiant leur utilisation ainsi que l'analyse statistique utilisée. Les sections de résultats ont été divisées en deux parties; la première partie concerne le protocole de localisation fovéale et la seconde présente les résultats du protocole de localisation périphérique.

Sur l'ensemble des deux protocoles (localisation fovéale et localisation périphérique), 38 des 40 participants n'ont perçu aucun déplacement spatial des cibles inférieures. Les deux participants ayant perçu des changements en ont seulement détecté cinq sur les trente déplacements possibles et ces essais ont été retirés de l'analyse.

### Protocole de localisation fovéale

Afin d'évaluer si la présence des essais perturbés avait une influence sur la performance des mouvements dirigés vers les positions de cible bien apprises (positions initiales) nous avons procédé comme suit. Il a été calculé pour les mouvements dirigés vers les quatre cibles initiales, les biais (erreur constante sagittale et latérale), la variabilité (erreur variable sagittale et latérale) et les temps de mouvement et ceci par en fin d'acquisition et en transfert. Ces données ont été soumises individuellement à une

ANOVA contrastant 2 groupes expérimentaux (vision-normale; cible-seule) x 2 phases expérimentales (acquisition et transfert) x 4 positions de cible (axiale-supérieure, latérale-supérieure, latérale-inférieure, axiale-inférieure) en utilisant des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

L'ANOVA calculée sur la précision spatiale ne montra aucun effet principal ou d'interaction significatifs impliquant la phase expérimentale ( $p_s > .15$ ). Les résultats de ces ANOVAs ont montré que le groupe cible-seule était moins précis et plus variable que le groupe vision-normale sur la composante latérale,  $F(3, 48) = 6.8$  et  $5.48$ , respectivement. Plus spécifiquement, les résultats montraient que comparativement aux participants du groupe vision, ceux du groupe cible-seule terminaient leur mouvement plus à droite des cibles inférieures et plus à gauche de la cible supérieure-axiale. Aucune différence significative n'apparaissait entre ces deux groupes pour la cible supérieure-latérale. Finalement, les mouvements effectués par les participants du groupe cible-seule étaient plus variables que ceux observés au sein du groupe vision normale et ceci en acquisition et en transfert. La seule exception notable concernant la variabilité des mouvements entre les deux groupes concerne la cible inférieure-latérale lors de la phase de transfert pour laquelle on observait une dispersion similaire au sein des deux groupes. Les données relatives à la précision spatiale sont résumées dans les tableaux 4a et 4b.

L'ANOVA calculée sur le temps de mouvement a révélé une interaction significative groupe expérimental x position de cible,  $F(3, 48) = 9.0$ . La décomposition de cette interaction montrait que le temps de mouvement relatif à la cible inférieure-axiale était significativement plus long dans le groupe cible-seule comparativement à celui obtenu dans le groupe vision. De plus, dans chaque groupe les cibles latérales

avaient des temps de mouvement identiques et significativement plus longs que ceux obtenus pour les cibles axiales. Une exception était à noter au sein du groupe cible-seule où la cible inférieure-axiale avait un temps de mouvement significativement plus long que ceux des trois autres cibles (voir tableaux 4a et 4b).

Rappel des positions de cible tableaux 4a et 4b: Précision spatiale (mm) et temps de mouvements (ms) pour les cibles primaires; protocole de localisation fovéale.

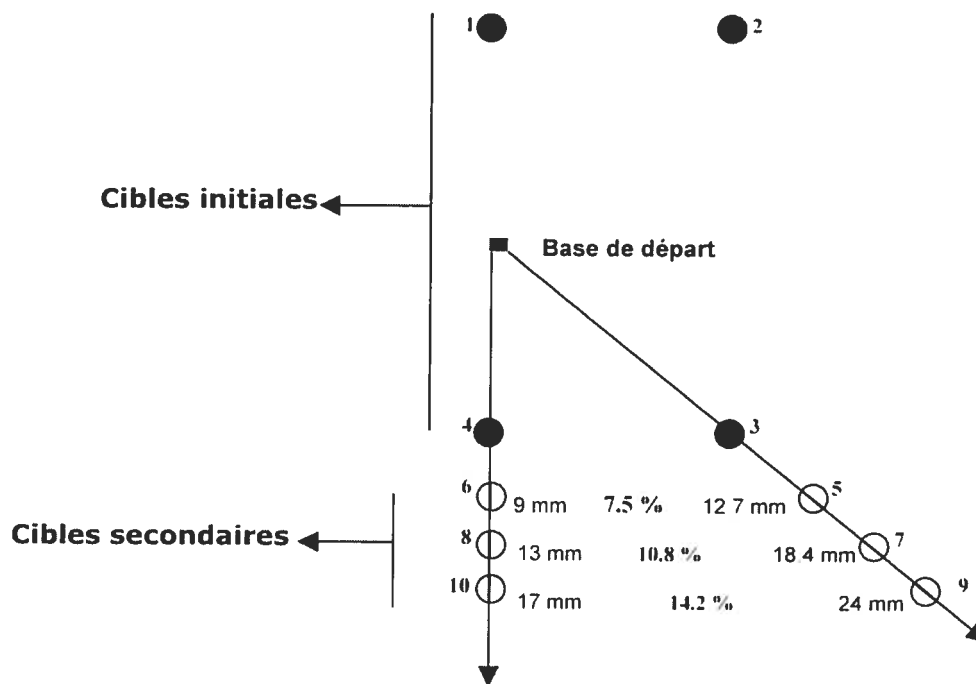


Tableau 4a. groupe vision

	Acquisition	Transfert
Cibles	Erreur constante latérale	
1	1.39	0.52
2	5.68	5.92
3	1.15	2.50
4	1.12	1.05
	Erreur variable latérale	
1	2.86	2.98
2	5.15	6.34
3	4.52	5.13
4	2.50	2.16
	Erreur constante sagittale	
1	0.02	2.01
2	3.36	0.96
3	0.39	-1.38
4	1.08	-0.68
	Erreur variable sagittale	
1	4.94	4.59
2	4.30	5.38
3	4.42	4.34
4	3.97	5.38
	Temps de mouvement	
1	409.87	404.84
2	440.67	417.54
3	457.18	437.56
4	418.91	399.50

Tableau 4b groupe cible-seule

	Acquisition	Transfert
Cibles	Erreur constante latérale	
1	-6.57	-4.84
2	-1.19	1.95
3	5.83	9.19
4	8.17	9.45
	Erreur variable latérale	
1	3.93	4.86
2	7.27	9.11
3	8.97	4.88
4	5.55	7.70
	Erreur constante sagittale	
1	-0.63	0.92
2	-0.92	1.07
3	5.34	-8.58
4	9.21	-10.79
	Erreur variable sagittale	
1	6.05	8.49
2	6.03	7.01
3	7.50	9.52
4	9.01	7.24
	Temps de mouvement	
1	412.33	417.13
2	428.47	432.13
3	443.49	427.51
4	429.00	454.20

L'ensemble des résultats obtenus dans le protocole de localisation fovéale n'a montré aucun impact de l'inclusion des essais perturbés (changement spatial de la position de la cible) sur les mouvements préalablement appris. Nous avons donc procédé à l'analyse principale afin d'évaluer s'il y avait une différence entre les mouvements

dirigés vers les cibles inférieures initiales et leurs cibles secondaires. Cette analyse nous permettait d'évaluer si ces quatre positions de cibles initiales (3 et 4) et secondaires (5, 6, 7, 8, 9, 10) partageaient un programme moteur commun et imprécis ou si le système visuo-moteur adaptait la planification au cas par cas. Ainsi nous voulions comprendre d'une manière plus théorique la facilité avec laquelle nos participants avaient pris en charge les changements spatiaux induits par les verres progressifs lors des expériences précédentes (chapitres 3 et 4). Nous avons donc évalué lors de la phase de transfert, les données relatives à la planification pour les cibles inférieures et leurs cibles secondaires. Pour cela nous avons calculé individuellement pour chaque cible et ses dérivées (inférieure-axiale et cibles secondaires; inférieure-latérale et cibles secondaires) où (longueur de vecteur) et quand (occurrence temporelle) se produisait chaque marqueur cinématique. Nous avons ensuite soumis individuellement ces données à une ANOVA contrastant 2 groupes (vision-normale; cible-seule) x 4 positions de cible (cible d'intérêt et ses trois dérivées) x 4 marqueurs cinématiques avec des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

Les résultats de ces ANOVAs révélèrent pour l'occurrence spatiale des marqueurs cinématiques une interaction marqueur cinématique x position de cible et ceci tant pour l'analyse relative à la cible axiale-inférieure (4) et ses cibles secondaires (6, 8, 10) que pour la cible latérale-inférieure (3) et ses cibles secondaires (5, 7, 9),  $F(9, 144) = 14.23$  et  $15.45$  respectivement. Aucun effet principal ou interaction significatifs ne fut observé sur les données cinématiques relatives au groupe ( $p_s > .15$ ). Les valeurs moyennes relatives à l'occurrence spatio-temporelle ainsi que les données de précision

spatiale de cette analyse principale sont consignées en annexe B dans les tableaux 5a et 5b.

Pour essayer de visualiser plus clairement les petites différences de planification entre les essais contrôles (positions de cibles initiales) et les essais perturbés, nous avons procédé comme suit. Les positions des cibles secondaires ont été transposées en pourcentage de perturbation par rapport à la position de cible initialement apprise et ceci pour les groupes vision-normale et cible-seule. Pour chaque cible inférieure il y avait 3 positions de cibles secondaires possibles. La première position de cible secondaire correspondait à une perturbation de 7.5 % par rapport à la position de la cible initiale. La deuxième position correspondait à une perturbation de 10.8 % et celle de la troisième position correspondait à une perturbation de 14.2 % (figure 7). Nous avons ensuite transformé les données moyennes de chaque marqueur cinématique des essais perturbés, en pourcentage de l'occurrence spatiale de leurs marqueurs respectifs au sein des essais contrôles. Les résultats consignés dans le tableau 6 montrent qu'aux pics de vitesse, il n'y a pas de tendance évidente de mise à l'échelle de la commande motrice par rapport à la distance perçue de la cible.

Nous avons soumis ces données à une ANOVA contrastant 3 types d'essai (perturbés de 7.5 %, 10.8 % ou 14.2 %) x 4 marqueurs cinématiques (accélération, vitesse, décélération et fin de mouvement) en utilisant des mesures répétées pour le dernier facteur. Cette analyse a été conduite séparément pour les essais perturbés axiaux et latéraux ainsi que pour les conditions de vision-normale et de cible-seule.

Les résultats de ces ANOVAs n'ont montré aucun effet ou d'interaction significatifs impliquant le type d'essai perturbé ( $p > .15$ ). Les valeurs moyennes



obtenues lors de cette analyse sont consignées dans le tableau 6. Pour mieux comprendre les mécanismes mis en jeu nous décrirons les valeurs du tableau 6 en fonction des perturbations appliquées. Cependant, nous n'exploiterons que les valeurs obtenues à partir du pic de vitesse car à l'accélération les données étaient trop variables donc peu interprétables. Pour les essais perturbés axiaux et latéraux, on observait lors de la condition vision-normale que la perturbation n'était que partiellement corrigée par les mécanismes de planification. Au pic de décélération on observe une tendance de l'occurrence de ce marqueur allant dans le sens des perturbations qui restent cependant partiellement compensées. Pour la condition cible-seule, un comportement identique était observé sauf pour les essais dirigés vers les cibles axiales.

Rappel des positions de cible et tableau 6 :

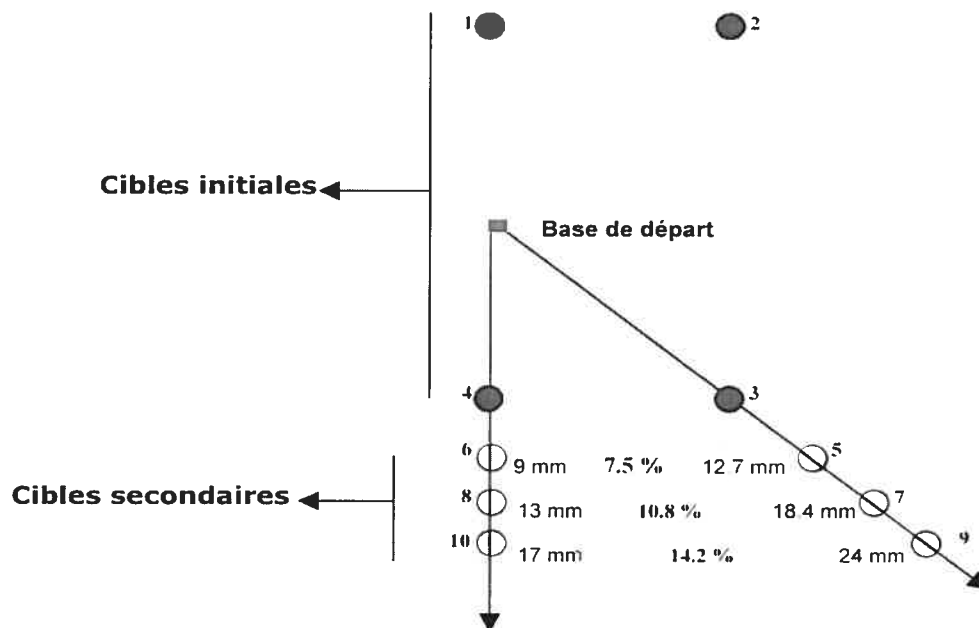


Tableau 6

## Vision normale

	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles					
3*	0	11.29	83.53	160.02	172.70
5	7.50	24.13	5.54	7.36	6.71
7	10.83	24.34	5.50	10.29	10.08
9	14.17	41.55	8.41	12.94	12.18

\*

	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles					
4*	0	9.14	62.77	114.32	120.67
6	7.50	-0.74	8.07	8.74	8.06
8	10.83	-4.95	7.69	7.92	9.25
10	14.17	9.05	10.25	13.16	12.45

\*

## Cible seule

	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles					
3*	0	14.25	91.06	173.32	184.19
5	7.50	-10.12	6.90	2.11	2.70
7	10.83	15.62	10.13	7.25	7.30
9	14.17	-7.06	9.48	7.99	7.84

\*

	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles					
4*	0	7.99	67.39	121.73	129.17
6	7.50	17.85	8.45	8.37	8.95
8	10.83	11.64	9.24	9.75	9.88
10	14.17	31.45	8.83	10.02	11.74

À la lumière de ces données, il n'y a pas de véritable tendance montrant un ajustement de la planification par rapport aux perturbations spatiales imposées lors de la phase de transfert. Ceci tant pour le groupe vision-normale que pour le groupe cible-seule. Il apparaît donc qu'il n'y a pas d'élaboration précise du programme moteur pour le type de biais que nous avons simulé. Il semble que la planification soit basée essentiellement sur ce qui avait été appris lors de la phase d'acquisition avec les positions de cible initiales. Suite à ces résultats, nous avons voulu évaluer si ce comportement se répétait lorsque la localisation de la cible se faisait avec la vision périphérique, i.e. avec une moins bonne discrimination des positions résultant d'une moins bonne acuité visuelle en périphérie de la rétine.

#### Protocole de localisation périphérique

#### Résultats

Comme dans le protocole de localisation fovéale, nous avons évalué le potentiel impact des déplacements spatiaux des cibles (essais perturbés) sur la performance des cibles initiales. Pour cela, nous avons calculé pour les phases d'acquisition et de transfert, les biais (erreur constante sagittale et latérale), la variabilité (erreur variable sagittale et latérale) ainsi que les temps de mouvement. Ces données furent soumises individuellement à une ANOVA contrastant 2 groupes expérimentaux (vision-normale; cible-seule) x 2 phases expérimentales x 4 positions de cible (axiale-supérieure, latérale-supérieure, latérale-inférieure, axiale-inférieure) en utilisant des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

Les ANOVAs calculées sur la précision spatiale ne révélèrent aucun effet principal ou d'interaction significatif impliquant la phase expérimentale ( $p_s > .15$ ). Cependant, les résultats montrèrent des interactions significatives groupe expérimental x position de cible à la fois sur la composante sagittale (erreur constante,  $F(3, 51) = 10.7$ ; erreur variable,  $F(3, 51) = 29.6$ ) et sur la composante latérale (erreur constante,  $F(3, 51) = 9.1$ ; erreur variable,  $F(3, 51) = 9.5$ ) du mouvement. Ces interactions significatives montraient que les mouvements au sein du groupe cible-seule étaient significativement moins précis et plus variables comparativement aux résultats obtenus pour le groupe vision normale. L'ANOVA calculée sur le temps de mouvement ne montra pas d'effet ou d'interaction significatifs relatifs à la phase expérimentale ( $p_s > .15$ ). Ces données sont résumées dans les tableaux 7a et 7b. Une analyse complémentaire a montré que la précision spatiale entre la condition fovéale et la condition périphérique était semblable. Ce résultat était probablement dû à la connaissance du résultat qui était donnée après chaque essai.

Rappel des positions de cible tableaux 7a et 7b : Précision spatiale (mm) et temps de mouvements (ms) pour les cibles primaires; protocole de localisation périphérique.

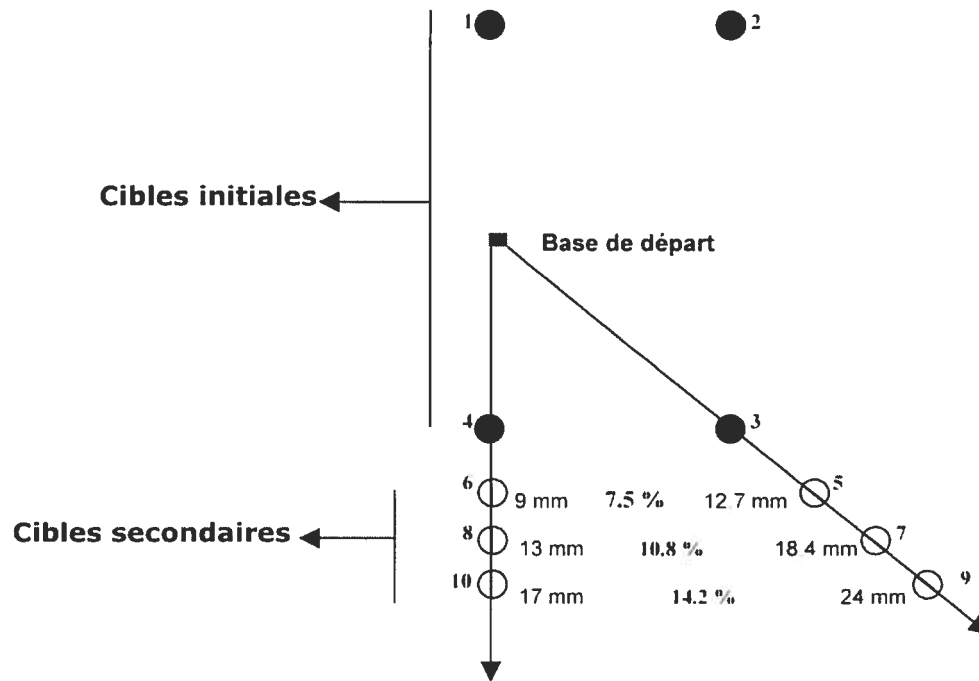


Tableau 7a

	Acquisition	Transfert
Cibles	Erreur constante latérale	
1	0.27	0.38
2	-0.42	0.03
3	0.78	0.87
4	0.59	1.21
	Erreur variable latérale	
1	1.30	1.44
2	2.79	3.28
3	2.56	3.35
4	2.41	2.08
	Erreur constante sagittale	
1	-1.55	-1.83
2	-0.47	-1.00
3	1.16	0.62
4	-0.18	-0.57
	Erreur variable sagittale	
1	2.74	2.76
2	2.96	2.99
3	2.60	0.57
4	3.60	3.25
	Temps de mouvement	
1	403.76	399.30
2	413.70	409.42
3	455.74	412.10
4	412.76	453.76

Tableau 7b

	Acquisition	Transfert
Cibles	Erreur constante latérale	
1	-5.60	-5.10
2	-0.65	-1.08
3	4.93	7.15
4	8.52	7.43
	Erreur variable latérale	
1	6.58	5.69
2	8.16	10.94
3	9.29	12.47
4	5.89	4.93
	Erreur constante sagittale	
1	6.62	1.47
2	0.97	-1.12
3	7.58	7.44
4	5.76	-9.44
	Erreur variable sagittale	
1	7.15	10.09
2	7.16	9.99
3	8.60	8.02
4	9.45	-7.84
	Temps de mouvement	
1	421.76	408.60
2	424.91	414.88
3	456.07	455.58
4	427.56	427.23

Les résultats de précision spatiale n'ayant montré aucun impact des essais perturbés (changements spatiaux de la position de la cible) sur la précision spatiale des mouvements préalablement appris, nous avons donc procédé à l'analyse principale. Nous avons évalué si les mécanismes de planification et de contrôle en temps réel du

mouvement étaient similaires pour les cibles inférieures et leurs cibles secondaires. Pour cela nous avons calculé individuellement pour chaque cible et ses dérivées (inférieure-axiale et cibles secondaires; inférieure-latérale et cibles secondaires) où (longueur de vecteur) et quand (occurrence temporelle) se produisait chaque marqueur cinématique. Nous avons ensuite soumis individuellement ces données à une ANOVA contrastant 2 groupes (vision; cible-seule) x 4 positions de cible (cible d'intérêt et ses trois dérivées) x 4 marqueurs cinématiques avec des mesures répétées pour les deux derniers facteurs.

Les résultats de ces ANOVAs révélèrent pour l'occurrence spatiale des marqueurs cinématiques une interaction marqueur cinématique x position de cible et ceci tant pour l'analyse relative à la cible axiale-inférieure (4) et ses cibles secondaires (6, 8, 10) que pour la cible latérale-inférieure (3) et ses cibles secondaires (5, 7, 9),  $F(9, 162) = 14.56$  et  $16.8$ , respectivement. Aucun effet principal ou interaction significatifs ne fut observé sur les données cinématiques relatives au temps ( $p_s > .15$ ) Les données moyennes relatives à ces ANOVAs sont consignées dans les tableaux 8a et 8b et ne révèlent pas de différence de planification entre les cibles initiales et les cibles secondaires (voir valeurs spatio-temporelles aux pics d'accélération et de vitesse).

Les valeurs moyennes relatives à l'occurrence spatio-temporelle ainsi que les données de précision spatiale de cette analyse principale sont consignées en annexe B dans les tableaux 8a et 8b. Comme pour le protocole de localisation fovéale, nous avons procédé à une analyse relative au pourcentage de perturbation induit et ceci par rapport à l'occurrence relative des marqueurs cinématiques des essais perturbés en fonction des essais contrôles (voir tableau 9). Nous avons soumis ces données à une ANOVA contrastant 3 types d'essai (perturbés de 7.5 %, 10.8 % ou 14.2 %) x 4 marqueurs



cinématiques (accélération, vitesse, décélération et fin de mouvement) en utilisant des mesures répétées pour le dernier facteur. Cette analyse a été conduite séparément pour les essais perturbés axiaux et latéraux ainsi que pour les conditions de vision-normale et de cible-seule.

Les résultats de ces ANOVAs n'ont pas montré d'effet ou d'interaction significatifs impliquant le type d'essai perturbé ( $p > .15$ ). À l'intérieur de chaque condition visuelle, il n'apparaissait pas de différence significative entre les essais perturbés. Les valeurs moyennes obtenues lors de cette analyse sont consignées dans le tableau 9. Dans la condition de vision normale, les résultats montraient que les essais perturbés axiaux et latéraux ne présentaient aucune tendance caractéristique de la perturbation imposée à l'occurrence des pics de vitesse dans la condition de vision-normale. Par contre, une tendance semblable aux perturbations imposées apparaissait au pic de décélération lorsque la vision dynamique du mouvement était possible. Les résultats obtenus pour la condition cible-seule n'ont montré aucune tendance de l'occurrence spatiale des marqueurs cinématiques en fonction des perturbations qui étaient appliquées et ceci pour chaque type d'essai.

Ces résultats montrent que d'une manière générale les perturbations appliquées n'étaient pas totalement corrigées par les mécanismes de planification et ceci quel que soit la condition visuelle dans laquelle le mouvement était effectué (voir résultats obtenus au pic de vitesse). Ce comportement se maintient jusqu'en fin de mouvement pour le groupe cible-seule du fait de l'impossibilité de moduler le mouvement sur une base visuelle. Pour la condition vision-normale, une tendance suggérant une modulation des perturbations imposées émergeait à partir du pic de décélération. Ceci montre la

potentielle implication de mécanismes de modulation basés sur les afférences visuelles étant donné que cette tendance n'est pas retrouvée dans la condition cible-seule. Ce comportement était cependant plus marqué dans la condition de localisation périphérique que dans la condition de localisation fovéale.

Tableau 9 : protocole de fixation périphérique

Vision normale

	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles					
3*	0	12,30	77,25	155,75	170,46
5	7,50	-0,46	3,59	7,40	7,40
7	10,83	-6,83	7,39	11,72	10,45
9	14,17	-0,76	11,48	14,03	14,52

\*

	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles					
4*	0	7,87	57,44	109,20	119,62
6	7,50	5,22	2,02	10,14	7,76
8	10,83	9,07	9,84	9,36	10,20
10	14,17	20,07	8,14	12,23	14,22

Cible seule

	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles					
3*	0	12,40	91,93	170,08	180,27
5	7,50	13,22	6,55	3,20	3,00
7	10,83	6,63	6,42	5,72	5,74
9	14,17	32,40	10,36	8,92	8,22

Tableau 9 (suite)

Cibles	Perturbation (%)	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
4*	0	8,92	65,71	120,53	129,00
6	7,50	0,02	6,99	5,67	5,63
8	10,83	28,93	6,90	7,33	7,44
10	14,17	39,19	13,82	11,48	11,40

\*

### Discussion

L'ensemble des résultats obtenus dans l'expérience 5 a montré des profils qui suggèrent pourquoi aucun effet des perturbations visuelles n'a été associé au port des verres progressifs dans les expériences 2, 3 et 4 lorsque les afférences visuelles étaient disponibles. En effet, il semble que ce genre de perturbation est facilement pris en charge par les mécanismes de contrôle mis en place par le système visuo-moteur.

### Une planification imprécise

Les résultats que nous avons obtenus dans cette dernière expérience montrent que pour de petits biais spatiaux déplaçant la position de la cible à atteindre, le système visuo-moteur ne procède pas à une programmation spécifique du mouvement. En effet, pour différents changements de position de la cible, les résultats ont montré que les déplacements spatiaux n'entraînaient pas de modification significative de l'impulsion motrice de base et ce, même dans le cas où la cible était déplacée de 24 mm (soit 14 % de la distance totale). Les résultats montraient que les biais n'étaient que partiellement corrigés par les mécanismes de planification. Ce qui conforte d'une certaine manière les

résultats obtenus dans l'expérience 1 suggérant une planification motrice plutôt imprécise du fait de mécanismes de contrôle très efficaces basés sur la vision.

#### Compensation optimale des biais perceptifs en présence des afférences visuelles

Lors des expériences 2, 3 et 4 les résultats montraient qu'en présence des afférences visuelles dynamiques les biais induits par les verres progressifs n'affectaient pas le mouvement. La précision finale du mouvement reposerait donc principalement en condition de vision sur des mécanismes de modulation qui permettaient de compenser les biais optiques induits; mécanismes utilisant les afférences visuelles dynamiques. Cette notion concernant l'efficacité des mécanismes basés sur la vision dynamique s'appuie sur les résultats de la condition cible-seule (expériences 2 et 3). Pour ces groupes cible-seule, on observait un ajustement du mouvement qui était biaisé dans le sens de la perturbation lors du port des verres progressifs et qui affectait l'étendue du mouvement. D'ailleurs ce type d'ajustement de l'étendue du mouvement influencé par un biais perceptif a également été obtenu lorsque la perturbation était appliquée sur la position initiale du mouvement (Sainburg, Lateiner, Latash & Bageistero, 2003).

Dans une étude, Sainburg et ses collaborateurs (2003) utilisaient une méthode altérant la position perçue de l'effecteur sur la base de départ. Les participants de cette étude devaient effectuer des mouvements vers trois positions de cible différentes ( $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ). Les participants devaient effectuer des mouvements non-corrigés vers l'une de ces cibles en respectant une fenêtre temporelle de 400 à 600 ms. La condition visuelle utilisée était une condition de cible-seule et les participants avaient de la CR après chaque essai. Suite à un mouvement la position du curseur ne pouvait être vue que dans

un rayon de 3 cm autour de la base de départ. La position du curseur pouvait être perturbée de manière antérieure ou postérieure par rapport à la direction du mouvement ou de manière perpendiculaire (perturbation de 3.5 cm). Un deuxième groupe était exposé à des perturbations radiales (perturbation de 5 cm correspondant à la résultante des perturbations antérieures et postérieures). Les résultats de cette étude montraient que quel que soit la perturbation utilisée pour déplacer la position initiale de l'effecteur, la direction du mouvement n'était pas significativement différente des résultats obtenus pour les essais contrôles. Ensuite, lorsque la perturbation était perpendiculaire, l'étendue du mouvement était identique à ce que l'on observait pour les essais contrôle. Par contre, pour les perturbations antérieures ou postérieures on observait que la position finale des mouvements était respectivement sous-estimée ou surestimée. Les résultats de cette étude montrent que les ajustements de l'étendue du mouvement sont également influencés par la perturbation induite lorsque celle-ci affecte la position initiale de l'effecteur.

La différence de résultat que nous avons observé entre les groupes vision/distorsion et cible-seule/distorsion dans les expériences 2 et 3 avec les verres progressifs semblerait donc résulter de l'efficacité des mécanismes de contrôle basé sur la vision dynamique. Nos résultats suggèrent qu'avec la vision dynamique du mouvement le système visuo-moteur compense parfaitement des biais subtils alors que ceux-ci affectent la planification et la précision terminale en condition cible -seule.

### Conflits visuo-proprioceptifs et effet sur le mouvement

Une différence de résultat serait à souligner entre la condition cible-seule de l'expérience 5 et les conditions cible-seule des expériences 2 et 3. En effet, dans l'expérience 5 aucun effet significatif n'a été relevé sur la planification du mouvement en condition cible-seule lors du biais induit. À l'inverse, les déplacements de cible générés par les verres progressifs induisaient un biais de la planification dans le sens des effets optiques dans nos autres expériences. Cette différence de résultats pourrait être due au fait que lors de l'utilisation des verres progressifs un conflit était généré entre les informations rétiniennes et extra-rétiniennes relatives à la position de la cible. Or, on sait que la combinaison de ces informations est importante au sein des mécanismes menant à la bonne localisation spatiale d'un objet dans l'espace (Bok, 1986; Biguer, Donaldson, Hein, & Jeannerod, 1988). La localisation spatiale de l'objet à atteindre étant cruciale dans l'élaboration de la commande motrice, il est alors possible que tout biais induit entre les informations sensorielles menant à la localisation de la cible affecte de fait la planification. A contrario, dans la dernière expérience aucun conflit entre les informations rétiniennes et extra-rétiniennes n'était présent car ce qui était vu correspondait à la réalité spatiale de la position de la cible, ce qui pourrait expliquer l'absence de biais lors de la planification.

### Mécanismes de contrôle inconscients et automatiques

Les mécanismes de contrôle mis en place lors des déplacements spatiaux subtils que nous avons induits entre les essais ont une particularité. En effet, il semble que ces mécanismes soient automatiques, inconscients et qu'ils exercent un contrôle de type

continu ou pseudo-continu. En effet, les changements de position que nous imposons dans cette expérience n'étaient pas perçus consciemment par les participants et aucune correction discrète n'était générée pour contrôler le mouvement. Ces mécanismes pourraient probablement s'inscrire dans le modèle de contrôle décrit par Desmurget et Grafton (2000). Ce modèle utilisant une composante prédictive basée sur la copie de l'efférence motrice et/ou oculomotrice pourrait en effet expliquer l'aspect continu.

De plus, si ces déplacements spatiaux ne sont pas perçus consciemment, cela suggère que la grandeur des déplacements imposés s'inscrit dans une fenêtre de tolérance à l'intérieure de laquelle le système visuo-moteur module automatiquement le mouvement sans forcément procéder à l'élaboration d'une commande motrice spécifique de la distance à parcourir. L'automatisme de ces mécanismes et l'aspect inconscient des corrections mises en place suggérerait également la potentielle implication de la voie visuelle dorsale impliquée dans le contrôle du mouvement et décrite par Goodale et ses collaborateurs (Goodale, Milner, Jakobson, & Carey, 1991; Goodale & Milner, 1992; Goodale & Westwood, 2004)

## Conclusion

Les résultats obtenus dans la dernière expérience de ce chapitre expliquent la facilité avec laquelle les distorsions générées par les verres progressifs ont été pris en charge dans le type de tâche que nous avons utilisé avec des verres progressifs. Il semble en effet que les perturbations induites par les verres progressifs peuvent être rapidement prises en charge par le système visuo-moteur lorsque les afférences visuelles dynamiques sont présentes. Il apparaît clairement que les mécanismes de contrôle visuo-

moteur sont assez robustes pour assurer la précision du mouvement lors de telles perturbations à partir du moment où les informations visuelles relatives au mouvement sont disponibles. Finalement, ces mécanismes semblent avoir une certaine plage d'adaptabilité à différents types de distorsion (le tangage par exemple) et demeurent efficaces lors du vieillissement.



## Bibliographie

- 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(1), 75-85.
- Biguer, B., Donaldson, I. M., Hein, A., & Jeannerod, M. (1988). Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain*, 111 (Pt 6), 1405-1424.
- Bock, O. (1986). Contribution of retinal versus extraretinal signals towards visual localization in goal-directed movements. *Exp Brain Res*, 64(3), 476-482.
- Biguer, B., Donaldson, I. M., Hein, A., & Jeannerod, M. (1988). Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain*, 111 (Pt 6), 1405-1424.
- Bock, O. (1986). Contribution of retinal versus extraretinal signals towards visual localization in goal-directed movements. *Exp Brain Res*, 64(3), 476-482.
- Faubert, J. (2002). Visual perception and aging. *Can J Exp Psychol*, 56(3), 164-176.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, 349(6305), 154-156.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neurosci*, 15(1), 20-25.

- Goodale, M. A., & Westwood, D. A. (2004). An evolving view of duplex vision: separate but interacting cortical pathways for perception and action. *Curr Opin Neurobiol*, 14(2), 203-211.
- Habak, C., & Faubert, J. (2000). Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res*, 40(8), 943-950.
- Lhuisset, L., & Proteau, L. (2002). Developmental aspects of the control of manual aiming movements in aligned and non-aligned visual displays. *Exp Brain Res*, 146(3), 293-306.
- Lhuisset, L., & Proteau, L. (2004). Visual control of manual aiming movements in 6- to 10-year-old children and adults. *J Mot Behav*, 36(2), 161-172.
- Proteau, L. (2005). Visual afferent information dominates other sources of afferent information during mixed practice of a video-aiming task. *Exp Brain Res*, 161(4), 441-456.
- 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(4), 367-384.
- Robin, C, Toussaint, L, Blandin, Y & Proteau, L (2005). Specificity of learning in a video-aiming task: modifying the salience of dynamic visual cues. *J Mot Behav*, 37(5), 367-376.
- Redding, G. M., Rossetti, Y., & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method. *Neurosci Biobehav Rev*, 29(3), 431-444.

- Sainburg, R. L., Lateiner, J. E., Latash, M. L., & Bagesteiro, L. B. (2003). Effects of altering initial position on movement direction and extent. *J Neurophysiol*, *89*(1), 401-415.
- Saunders, J. A., & Knill, D. C. (2005). Humans use continuous visual feedback from the hand to control both the direction and distance of pointing movements. *Exp Brain Res*, *162*(4), 458-473.
- Stelmach, G. E., Goggin, N. L., & Amrhein, P. C. (1988). Aging and the restructuring of precued movements. *Psychol Aging*, *3*(2), 151-157.
- Walker, N, Philbin, D.A, & Fisk, A.D. (1997). Age-related differences in movement control: adjusting submovement structure to optimize performance. *J Gerontol B Sci Soc Sci* *52*(1), 40-52.

## Discussion générale

L'objectif de cette thèse était d'étudier les mécanismes de planification/contrôle du mouvement ainsi que les potentielles adaptations mises en place lorsque des distorsions optiques subtiles et multiples étaient induites par des verres progressifs. En effet, la structure de ces verres fait que les objets regardés à travers certaines portions de la lentille peuvent être perçus plus loin que leur position réelle avec une distorsion optique maximale localisée dans la portion inféro-latérale du verre.

### Contrôle continu du mouvement lors du port de verres progressifs

Les résultats de nos expériences montrent qu'en condition normale d'utilisation (en présence des afférences visuelles dynamiques), aucun biais relatif aux verres progressifs n'était enregistré sur la précision terminale du mouvement. De plus, la cinématique du mouvement obtenue pour nos groupes vision/distorsion ne montrait pas le recours à des corrections discrètes pour assurer la précision finale des mouvements. L'absence de corrections discrètes au sein des profils cinématiques des groupes vision/distorsion lors de nos trois expériences impliquant des verres progressifs suggère le recours à des mécanismes de contrôle du mouvement de type continu ou pseudo-continu. Un tel mode de contrôle a été suggéré lors d'études utilisant également des perturbations perceptives ayant un impact sur les informations visuelles dynamiques ou statiques impliquées lors d'un mouvement (Prablanc & Martin, 1992; Desmurget, Epstein, Turner, Prablanc, Alexandre, & Grafton, 1999; Prablanc, Desmurget, & Grea, 2003; Saunders & Knill, 2005).

Par exemple, Saunders et Knill (2003) ont utilisé une procédure perturbant la représentation visuelle de la main à différents moments d'un mouvement de pointage; tôt dans l'exécution et à mi-course. Cette procédure permettait ainsi d'évaluer si des corrections basées sur l'information visuelle dynamique pouvaient se produire de manière continue et en dehors de la phase finale où le mouvement est ralenti. La tâche consistait à faire des mouvements de pointage rapide (450 ms) ou lent (600 ms) sur une table avec l'index de la main dominante. Les cibles étaient représentées au sein d'un espace virtuel et un capteur posé au bout de l'index permettait également de représenter les mouvements du doigt. Ces éléments étaient projetés sur un miroir et pouvaient être vus en trois dimensions à l'aide de lunettes 3D. Le miroir empêchait de voir directement l'effecteur se déplacer sur la table et les cibles virtuelles étaient alignées dans le plan de la table. Les mouvements s'effectuaient sur l'axe latéral de la table et pouvaient être perturbés de manière perpendiculaire à cet axe. Les perturbations induites pouvaient se produire au quart ou à la moitié de la distance à parcourir. Les résultats des essais perturbés ont montré que lors de l'exécution des mouvements, des corrections de la trajectoire intervenaient pour les perturbations arrivant très tôt ou à mi-parcours et ceci sans que les participants aient conscience de la perturbation. Certaines corrections s'effectuaient même avec 60 % de la distance restant à parcourir et survenaient avant le pic de vitesse. Le fait que le même type de correction était observée peu importe le moment de la perturbation suggérait la notion de continuité du contrôle au cours de l'exécution du mouvement. Ceci conforte notre suggestion de l'implication d'un mode de contrôle de ce type au sein des groupes vision (vision/distorsion; plano et vision-normale) ayant pris part aux expériences 2, 3 et 4 de la présente thèse. Ce mode de

contrôle en continu a d'ailleurs été suggéré dans des tâches de pointage classiques (Proteau & Isabelle, 2002; Bédard & Proteau, 2004) et lors de tâches de pointage utilisant des perturbations (Sarlegna, Blouin, Brescianni, Bourdin, Vercher, & Gauthier, 2003; Saunders & Knill, 2004).

Dans un protocole utilisant la perturbation de la position spatiale de la cible à atteindre, il a également été suggéré une correction de la trajectoire en cours d'exécution et ceci en l'absence des afférences visuelles dynamiques (Pélisson, Prablanc, Goodale, & Jeannerod, 1986). Dans cette étude, les participants devaient effectuer des mouvements de pointage le plus rapidement et le plus précisément possible. La représentation de l'effecteur était masquée à l'initiation du mouvement et une perturbation de la position spatiale de la cible était appliquée lorsque la saccade visuelle effectuée vers la cible atteignait son pic de vitesse. Ainsi, la suppression saccadique empêchait toute perception consciente du déplacement de la cible. Les résultats ont montré que durant les essais où le saut de cible était appliqué, les trajectoires subissaient des corrections vers la nouvelle position de cible alors que les sauts n'étaient pas perçus consciemment par les participants. Ce type de résultat a également été obtenu lors d'une tâche de saut de cible en l'absence des afférences visuelles dynamiques pour une patiente souffrant d'une neuropathie sensorielle la privant du sens proprioceptif (Bard et al., 1999). Dans cette expérience les auteurs demandaient à un groupe contrôle sain et à la patiente d'effectuer une tâche de pointage en condition de cible-seule dans une procédure expérimentale générant des sauts de cible. Les résultats ont montré que les trajectoires de mouvement pouvaient être corrigées tôt et tard dans le mouvement et ceci tant pour le groupe contrôle que pour la patiente.

Les résultats que nous avons obtenus dans les expériences 2, 3 et 4 pour nos groupes vision/distorsion contrastés aux diverses expériences ayant appliquées des perturbations sur les informations visuelles statiques ou dynamiques confortent la notion qu'un mouvement peut être corrigé de manière continue ou pseudo-continue. De plus, le mode de contrôle mis en place semble inconscient et automatique puisque dans l'ensemble de ces expériences, les participants ne se rendaient pas compte des perturbations induites. Le fait que la trajectoire d'un mouvement puisse être ainsi corrigée en présence ou en l'absence des afférences visuelles et proprioceptives suggère un mode de contrôle basé sur une composante prédictive. Desmurget et Grafton (2000) ont décrit un modèle qui pouvait supporter la possibilité d'un contrôle du mouvement en continu n'ayant pas pour substrat principal les afférences visuelles et proprioceptives de l'effecteur se déplaçant vers la cible.

Ces auteurs ont décrit un mode de contrôle hybride qui se caractériserait par une commande motrice modulée via un mécanisme prédictif qui utiliserait une copie de la commande motrice initiale, les informations oculomotrices ainsi que les afférences sensorielles issues du mouvement lorsque celles-ci sont disponibles. Plus précisément, ce modèle suggère qu'avant l'exécution du mouvement une commande motrice grossière est élaborée en fonction des informations spatiales relatives à la cible et à la position initiale de l'effecteur. Cette commande motrice serait par la suite dirigée vers la moelle épinière pendant qu'une copie de cette commande (copie de l'efférence) serait générée au niveau cortical. La comparaison de cette copie de l'efférence à la copie des commandes oculomotrices et aux afférences sensorielles inhérentes au mouvement permettrait alors de déterminer la position et la vitesse de l'effecteur et de prédire la

position finale de celui-ci à l'issue du mouvement. Cette prédiction de la position finale de l'effecteur serait ensuite comparée à la position spatiale de la cible à atteindre. En l'absence d'afférences sensorielles issues du mouvement (sans vision dynamique et sans proprioception), ce modèle de contrôle se baserait sur la comparaison de la copie de la commande motrice à celle des commandes oculomotrices (Bard et al., 1999). En cas de non-correspondance de la position finale prédite pour l'effecteur et la position de la cible à atteindre, un signal d'erreur serait produit et une correction serait appliquée au mouvement en cours d'exécution afin de terminer sur la cible.

#### Stratégie de contrôle et afférences sensorielles

Dans les expériences 2 et 3 de cette thèse, les résultats ont montré que lorsque les informations visuelles dynamiques n'étaient pas disponibles (groupes cible-seule), une adaptation visuo-motrice se mettait en place lors de l'acquisition. Cette adaptation était confirmée par la présence d'un effet consécutif lorsque l'on enlevait les lunettes durant le post-test. En comparant les résultats d'acquisition et de post-test des conditions cible-seule/distorsion on s'aperçoit que durant l'acquisition, les verres progressifs entraînaient un biais observé très tôt au sein du mouvement (pic de vélocité), ce qui suggère que les distorsions optiques affectaient la planification du mouvement. Ce biais se répercutait ensuite tout au long du mouvement; les mouvements se terminaient plus à droite en acquisition comparativement aux données du post-test. Lors du post-test, les résultats montrèrent que les mouvements se terminaient significativement plus à gauche et la différence observée se manifestait même au pic de vélocité quand on contrastait ces résultats à ceux de l'acquisition. Ces résultats suggèrent qu'en l'absence des afférences



visuelles dynamiques, les mécanismes de contrôle impliqués étaient probablement moins efficaces pour compenser les effets optiques. L'évidence de la mise en place d'un nouveau modèle interne ayant façonné la planification ainsi que l'absence d'ajustements basés sur la proprioception lors du post-test suggèrent indirectement un mécanisme de contrôle du mouvement reposant sur un mode en boucle ouverte.

En effet, si l'on était en présence d'une stratégie de contrôle reposant principalement sur le traitement des informations proprioceptives, la persistance du modèle interne développé lors de l'acquisition n'aurait pas été observée en post-test du fait d'ajustements basés sur la proprioception. Or, aucun ajustement de ce type n'a été observé en post-test. La stratégie de contrôle mise en place dès l'acquisition semble donc reposer sur un plan moteur élaboré sur la base de la connaissance du résultat qui était donnée après chaque essai en acquisition. De plus dans ces groupes, peu de modulation était observée sur l'étendue du mouvement; ce qui montre que la proprioception serait moins efficace que la vision pour moduler le mouvement dans le contexte expérimental utilisé dans nos expériences.

Par exemple, si l'on reprend les résultats obtenus dans l'expérience 1 de cette thèse pour les groupes cible-seule, on remarque que quel que soit la taille de la cible aucune correction discrète n'était produite et surtout, la modulation en étendue était très faible dans ces groupes (résultats des CEV). Ceci suggère également qu'en l'absence de vision, le mode de contrôle impliqué repose sur la proprioception mais s'avère cependant moins efficace qu'avec la vision. D'ailleurs, d'autres études menées dans notre laboratoire ont montré une faible modulation de l'étendue du mouvement en l'absence d'afférences visuelles dynamiques et des mouvements également exempts de

corrections discrètes (Proteau & Isabelle, 2002; Lhuisset & Proteau, 2002; Bédard & Proteau, 2004).

Aussi, une étude ayant utilisée une tâche moins compatible que la notre suggère également un tel mode de contrôle en boucle ouverte (Novak, Miller, & Houk, 2000). La tâche était moins compatible dans le sens où elle impliquait de faire se déplacer un curseur en appliquant une rotation au niveau d'un bouton; ce qui d'ailleurs expliquerait peut-être le nombre important de corrections discrètes dans cette étude. Ces auteurs demandaient à des participants de produire une tâche de pointage avec des mouvements rapides et précis. Les cibles étaient séparées de  $30^{\circ}$  et disposées sur un demi-cercle. Les participants devaient respecter des temps de mouvement de 400 ms tout en assurant une précision du pointage de  $8^{\circ}$  par rapport à la position de la cible. À la fin des essais réussis, un signal sonore retentissait et permettait aux participants de savoir que le mouvement produit était précis. Les mouvements étaient exécutés dans une condition cible-seule. Les résultats de cette expérience montrèrent que les mouvements comportaient majoritairement des corrections discrètes et également des impulsions uniques de mouvements. Ce qui était intéressant dans cette expérience était qu'avec la pratique, les participants apprenaient à diminuer la proportion de corrections discrètes produites, à augmenter leur nombre d'atteinte de cible (46 % en fin de pratique) et à diminuer leur temps de réaction. Les auteurs ont suggéré que ces résultats reflétaient une stratégie mise en place avec la pratique afin de produire des impulsions de mouvement moins variables. Les auteurs de cette étude suggèrent que le SNC oeuvrerait dans ce type de condition visuelle à la production d'impulsions uniques de mouvement articulées sur un mode de contrôle en boucle ouverte.

La différence obtenue au sein de nos différentes conditions visuelles lors de l'exposition aux distorsions optiques s'expliquerait donc par une stratégie de contrôle différente. Dans un cas, la modulation de l'étendue était assurée par des mécanismes efficaces utilisant les afférences visuelles dynamiques (groupes vision-normale/distorsion). Dans le second cas, un mode de contrôle en boucle ouverte semblerait être produit.

Les mécanismes de contrôle en temps réel restent efficaces lors du vieillissement

Dans le chapitre 5, nous avons également évalué si les résultats de planification/contrôle que nous avons obtenus chez de jeunes adultes lors de l'exposition aux verres progressifs perduraient chez des personnes âgées qui représentent la vraie population concernée par le port ces verres. Nous savons qu'avec l'âge les mouvements peuvent être affectés au niveau des mécanismes liés à l'élaboration des plans moteurs (Stelmach, Goggin et Amrhein 1988; Haaland, Harrington, & Grice, 1993; Pratt, Chasteen, & Abrams, 1994; Walker, Philbin, & Fisk, 1997). De plus, il apparaît que les personnes âgées adoptent une stratégie visant à réduire la vitesse de leur mouvement afin de limiter l'augmentation de la variabilité au sein de leur mouvement. Nous avons donc évalué dans le chapitre 5 si lors d'une tâche contrainte de manière temporelle, des personnes âgées utilisaient les mêmes mécanismes que de jeunes adultes pour compenser les distorsions générées par les verres progressifs. Les résultats ont suggéré que les participants jeunes et âgés mettaient en place le même type de mécanisme de contrôle. Plus précisément, il apparaissait qu'en présence de la vision dynamique des mécanismes de modulation en temps réel de la première

impulsion de mouvement se mettaient en place. L'analyse des coefficients de variabilité montrait une chute significative de la variabilité entre le pic de décélération et la fin du mouvement au sein des deux groupes. De plus, aucune différence de précision spatiale n'était notée entre ces deux groupes d'âge.

Nous avons également procédé au même type d'analyse lors de rotations de la tête qui combinées avec les verres progressifs généraient un effet de tangage au niveau de la scène visuelle. Une fois de plus, aucune différence ne fut observée et d'ailleurs les résultats obtenus ne se différenciaient pas de ceux obtenus pour la condition statique. Ces résultats montraient donc que les mécanismes de contrôle mis en place pour compenser les distorsions des verres progressifs étaient maintenus et restaient efficaces lors du vieillissement. Récemment, une étude a cependant montré que le contrôle directionnel pouvait être altéré avec l'âge (Sarlegna, 2006). Dans cette étude, deux groupes (âgés et jeunes) devaient procéder à une tâche de pointage directionnel en condition de cible-seule lors d'une procédure utilisant des sauts de cible. Les participants étaient assis et regardaient la projection d'une cible au niveau d'un miroir semi-réfléchissant. Ils devaient manipuler un levier sous le miroir et produire des mouvements avec une extension totale du bras sans arrêter le levier sous la cible ("pass trough method"). Cette tâche n'imposait aucune contrainte sur l'étendue du mouvement et les participants pouvaient produire leur mouvement à une vitesse confortable (1 seconde). Durant les mouvements, la vision dynamique de l'effecteur n'était pas fournie.

Les résultats de cette étude ont montré une altération des mécanismes de contrôle mis en place. Cette altération se caractérisait par des corrections se mettant en place 200 ms plus tard au sein du groupe de personnes âgées comparativement au groupe jeune.

Notons cependant, que dans cette expérience les participants n'avaient pas accès aux informations visuelles dynamiques, qu'ils n'avaient pas de contrainte temporelle et qu'ils ne devaient contrôler que l'aspect directionnel du mouvement. Dans notre expérience où les mécanismes de contrôle sont identiques chez les jeunes adultes et les plus âgés, les informations visuelles dynamiques étaient disponibles, une contrainte temporelle était imposée et les participants devaient dans la mesure du possible contrôler l'amplitude du mouvement pour terminer sur la cible. De plus, les perturbations imposées dans l'expérience de Sarlegna et collaborateurs (2006) étaient 10 fois plus importantes que celles potentiellement générées par les verres progressifs. Ces différences sont probablement impliquées dans les résultats distincts obtenus dans ces deux études.

#### Adaptabilité des mécanismes de contrôle

Dans nos expériences, les biais imposés étaient progressifs et subtils. Cependant, les mécanismes assurant le contrôle du mouvement corrigeaient parfaitement ces biais car nous aurions alors observé des effets dans les conditions de vision. Ceci montre que les processus impliqués dans le contrôle du mouvement ont un niveau d'analyse très fin. De plus, il apparaît que la fenêtre d'adaptabilité de ces processus est très large relativement à l'amplitude des perturbations imposées. En effet, dans les études classiques d'adaptation visuo-motrice, les biais induits sont importants ou complexes (effet prismatique de l'ordre de 30 dioptries, rotations de  $30^{\circ}$  du cadre de référence dans lequel était représenté le mouvement etc...). Pour ces perturbations importantes, donc facilement détectées par les participants, on observe que le système visuo-moteur arrive

à s'adapter assez facilement pour satisfaire aux exigences perceptives de la tâche. Cette extraordinaire capacité d'adaptation a également été montrée au sein de notre laboratoire lors de protocoles combinant saut de cible et rotation de  $30^{\circ}$  ou combinant une tâche de saut de cible à une tâche secondaire augmentant la charge attentionnelle (Proteau, Mongeon, & Messier en préparation; Trempe & Proteau, en préparation).

Nous avons également procédé à une expérience non incluse dans cette thèse où nous avons évalué la planification et le contrôle du mouvement lors du port de verres progressifs chez de jeunes adultes, et ceci en combinaison avec une tâche secondaire augmentant la charge attentionnelle. La tâche consistait à effectuer un pointage manuel vers l'une de quatre positions de cible localisées en périphérie (la configuration expérimentale était similaire à celle utilisée dans l'expérience 4 de cette thèse). Les participants devaient cependant garder leur regard fixé sur la base de départ où des triades de lettres défilaient à l'initiation du mouvement. Le mouvement devait être produit vers la cible tout en lisant à voix haute les triades de lettre. Cette procédure avait pour objectif d'augmenter la charge attentionnelle. Nous voulions ainsi évaluer si les mécanismes de contrôle observés lors du port des verres progressifs demeuraient efficaces lorsque l'attention était surchargée. La performance des participants était évaluée lors d'une phase d'acquisition avec verres progressifs et lors d'une phase de transfert sans les lunettes. Nos résultats montraient que même avec cette charge attentionnelle supplémentaire, les mécanismes de contrôle basés sur la vision dynamique que nous avons observés dans les expériences 2, 3 et 4 de cette thèse demeuraient. En effet, en présence des afférences visuelles la précision spatiale finale des mouvements

était assurée. De plus, les coefficients de variabilité sur l'étendue montraient une modulation en le pic de décélération et la fin du mouvement. Ces résultats montraient que les mécanismes impliqués étaient résistants à une charge attentionnelle élevée.

Pour l'ensemble de ces trois études menées au sein de notre laboratoire, une constante émergeait et montrait la grande capacité d'adaptabilité des processus impliqués dans le contrôle du mouvement avec la particularité que les compensations prenaient place dès le premier essai. Ceci confirme qu'en plus d'avoir un niveau de détection très fin, les mécanismes que nous avons observés au cours de cette thèse sont capables, selon le contexte, de compenser dès le premier essai les distorsions auxquelles ils sont confrontés. La nécessité ayant menée à l'organisation fonctionnelle de tels mécanismes pourrait être une conséquence de la variabilité initiale observée à l'amorce des mouvements.

La planification n'est pas un processus précis

Une ligne d'évidence pourrait effectivement expliquer la raison pour laquelle le système visuo-moteur aurait développé des mécanismes de contrôle hautement efficaces pouvant compenser immédiatement les biais générés lors de contextes tel que des sauts de cible, des sauts de curseur ou des effets optiques tels que générés par les verres progressifs. Cette explication semblerait s'articuler autour du fait que la planification d'un mouvement serait un processus imprécis. Cette imprécision est d'ailleurs confirmée lorsque l'on regarde les valeurs de coefficient de variabilité que nous avons enregistrées au cours de cette thèse. La variabilité initiale du mouvement étant naturellement importante, il apparaît alors plausible que le système visuo-moteur ait développé des

mécanismes très puissants permettant de pallier à cette variabilité inéluctable du mouvement. Ces mécanismes serviraient à rapidement réduire l'imprécision observée au sein de la portion précoce du mouvement grâce au traitement des informations issues de la saccade visuelle initiale et/ou corrective ainsi que des informations sensorielles inhérentes au mouvement en cours d'exécution (Desmurget & Grafton, 2000). L'imprécision de l'élaboration de la commande motrice dont résulterait le développement de mécanismes de contrôle puissants pouvant se conformer à des situations perceptives complexes est démontrée par la diminution de la variabilité observée entre le pic d'accélération et le pic de vitesse au sein de nos expériences. De plus, cette hypothèse est également suggérée par les résultats de la dernière expérience de cette thèse (chapitre 5). Dans cette expérience, la position de la cible était déplacée à l'insu des participants entre les essais afin d'évaluer si la planification du mouvement s'ajustait précisément à la position perçue d'une cible ou si au contraire la commande initiale était une entité plutôt générique qui serait ensuite raffinée par des processus de contrôle.

Nos résultats ont clairement montré qu'aucun plan moteur spécifique n'était mis en place et ceci même pour des perturbations déplaçant la cible de 14 % par rapport à sa position initiale. En effet, l'analyse cinématique des conditions de vision et de cible-seule de cette dernière expérience a montré que la planification n'était pas spécifiquement élaborée par rapport à la perturbation appliquée. Les résultats montraient tout de même une tendance à la compensation mais cette tendance ne compensait pas totalement la perturbation appliquée (voir les tableaux 6 et 9 de l'annexe B).



En résumé, les différents résultats de cette thèse ont montré qu'en présence des distorsions générées par les verres progressifs, des mécanismes de contrôle de type continu se mettaient en place pour assurer la précision spatiale des mouvements. De plus, il apparaissait que ces mécanismes étaient automatiques et inconscients tout en ayant une grande capacité d'adaptation puisqu'ils étaient aussi efficaces lors de distorsions statiques ou dynamiques. Ces mécanismes de contrôle étaient également très robustes puisqu'ils demeuraient efficaces même dans un contexte de vieillissement.

À la lumière des caractéristiques énumérées et selon les modèles potentiels auxquels ces mécanismes pourraient appartenir, il semble que ceux-ci pourraient s'inscrire au sein de la voie visuelle dorsale impliquée dans le contrôle du mouvement (Goodale, Milner, Jakobson, & Carey, 1991; Goodale & Milner, 1992; Goodale & Westwood, 2004). Ces auteurs ont suggéré un traitement dissocié mais interdépendant des informations visuelles en une voie de perception et une voie de l'action (impliquée dans le contrôle du mouvement). La voie visuelle ventrale serait impliquée dans la discrimination des formes et des attributs psychophysiques des objets nous entourant. Alternativement, la voie visuelle dorsale (ou voie de l'action) serait impliquée dans le contrôle du mouvement. La dissociation de ces deux voies a été montrée avec des patients ayant des atteintes neurologiques (agnosie visuelle). Ces patients sont capables de produire un geste parfaitement adapté à une configuration spatiale (orientation d'un geste de préhension par exemple) même s'ils n'arrivaient pas, du fait de leur déficit, à discriminer consciemment la dimension spatiale à considérer pour réussir la tâche (James, Culham, Humphrey, Milner, & Goodale, 2003). De plus, des évidences venant

d'études d'imagerie neuro-fonctionnelle suggèrent également cette dissociation des voies visuelles de l'action et de la perception (Goodale, Meenan, Bulthoff, Nicolle, Murphy, & Racicot, 1994; Culham, Danckert, De Sousa, Gati, Menon, & Goodale, 2003). Des études ayant utilisées des illusions visuelles montrent également la distinction à faire entre la voie dorsale et la voie ventrale. L'illusion de Muller-Lyer a été souvent utilisée pour montrer la dissociation de ces voies. Cette illusion géométrique consiste à faire percevoir deux lignes de longueur identique. On demande généralement aux participants d'effectuer une tâche de préhension consistant à ajuster l'ouverture entre leur pouce et leur index (pince de préhension) en fonction de la longueur de ligne perçue. Typiquement, les participants perçoivent une différence dans la longueur des lignes mais ajustent parfaitement et inconsciemment l'ouverture de leur pince de préhension (Carey & Milne, 1999; Westwood, McEachem, & Roy, 2001). Ceci est une autre preuve suggérant l'existence d'une voie visuelle impliquée spécifiquement dans le contrôle du mouvement. Si le modèle de contrôle que nous avons abordé s'inscrit réellement au sein de la voie visuelle dorsale, il semble que celle-ci demeure efficace avec l'âge dans le cadre des tâches et des contextes perceptifs que nous avons utilisé puisque la performance de nos participants âgés était similaire à celle des jeunes dans l'expérience 4.

## Conclusion générale

L'ensemble des résultats de cette thèse a permis de mieux cerner certains aspects des mécanismes de planification et de contrôle du mouvement lors du contexte perceptif particulier induit par les verres progressifs. Cependant, les résultats que nous avons obtenus n'expliquent pas pourquoi certains porteurs de verres progressifs ont des problèmes d'acclimatation menant à des difficultés perceptivo-motrices. Ceci suggère que les problèmes perceptifs menant aux problèmes d'acclimatation interviennent dans des contextes autres. Par exemple, il est possible que la complexité perceptive des verres progressifs soit amplifiée en présence de phénomènes de vection au sein de la scène visuelle comme lors de tâche où un objet se déplacerait vers le participant ou encore lorsqu'un porteur de verre progressif serait impliqué dans une tâche de locomotion nécessitant une atteinte manuelle. Il serait intéressant tant à un niveau théorique que clinique d'évaluer de telles hypothèses afin de mieux évaluer les éventuelles limites des mécanismes de contrôles que nous avons décrits dans cette thèse. De telles connaissances qui pourraient aussi permettre de parfaire la conception de ces verres qui sont utilisés par la majeure partie des individus presbytes.

### Bibliographie générale

- Bard, C., Turrell, Y., Fleury, M., Teasdale, N., Lamarre, Y., & Martin, O. (1999). Deafferentation and pointing with visual double-step perturbations. *Exp Brain Res, 125*(4), 410-416.
- Bedard, P., & Proteau, L. (2001). On the role of static and dynamic visual afferent information in goal-directed aiming movements. *Exp Brain Res, 138*(4), 419-431.
- Bedard, 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*(1), 75-85.
- Bedard, P., & Proteau, L. (2005). Movement planning of video and of manual aiming movements. *Spat Vis, 18*(3), 275-296.
- Biguer, B., Donaldson, I. M., Hein, A., & Jeannerod, M. (1988). Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain, 111* (Pt 6), 1405-1424.
- Bock, O. (1986). Contribution of retinal versus extraretinal signals towards visual localization in goal-directed movements. *Exp Brain Res, 64*(3), 476-482.
- Carrozzo, M., McIntyre, J., Zago, M., & Lacquaniti, F. (1999). Viewer-centered and body-centered frames of reference in direct visuomotor transformations. *Exp Brain Res, 129*(2), 201-210.

- Desmurget, M., Epstein, C. M., Turner, R. S., Prablanc, C., Alexander, G. E., & Grafton, S. T. (1999). Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target. *Nat Neurosci*, 2(6), 563-567.
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends Cogn Sci*, 4(11), 423-431.
- Desmurget, M., Jordan, M., Prablanc, C., & Jeannerod, M. (1997a). Constrained and unconstrained movements involve different control strategies. *J Neurophysiol*, 77(3), 1644-1650.
- Desmurget, M., Rossetti, Y., Jordan, M., Meckler, C., & Prablanc, C. (1997b). Viewing the hand prior to movement improves accuracy of pointing performed toward the unseen contralateral hand. *Exp Brain Res*, 115(1), 180-186.
- Desmurget, M., Rossetti, Y., Prablanc, C., Stelmach, G. E., & Jeannerod, M. (1995). Representation of hand position prior to movement and motor variability. *Can J Physiol Pharmacol*, 73(2), 262-272.
- Faubert, J. (2002). Visual perception and aging. *Can J Exp Psychol*, 56(3), 164-176.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol*, 47(6), 381-391.
- Georgopoulos, A. P. (1988). Neural integration of movement: Role of motor cortex in reaching. *Faseb J*, 2(13), 2849-2857.
- Ghez, C., Gordon, J., & Ghilardi, M. F. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. Effects of visual information on accuracy. *J Neurophysiol*, 73(1), 361-372.

- Ghilardi, M. F., Gordon, J., & Ghez, C. (1995). Learning a visuomotor transformation in a local area of work space produces directional biases in other areas. *J Neurophysiol*, 73(6), 2535-2539.
- Goodale, M. A., 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(6064), 748-750.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., Cooper, S. E., & Ghez, C. (1994a). Accuracy of planar reaching movements. II. Systematic extent errors resulting from inertial anisotropy. *Exp Brain Res*, 99(1), 112-130.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1994b). Accuracy of planar reaching movements. I. Independence of direction and extent variability. *Exp Brain Res*, 99(1), 97-111.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. I. Spatial errors. *J Neurophysiol*, 73(1), 347-360.
- Habak, C., & Faubert, J. (2000). Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res*, 40(8), 943-950.
- Han, Y., & Lennerstrand, G. (1999). Changes of visual localization induced by eye and neck muscle vibration in normal and strabismic subjects. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 237(10), 815-823.
- Herbert, A. M., Overbury, O., Singh, J., & Faubert, J. (2002). Aging and bilateral symmetry detection. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 57(3), P241-245.

- Kalaska, J. F., & Crammond, D. J. (1995). Deciding not to go: Neuronal correlates of response selection in a go/nogo task in primate premotor and parietal cortex. *Cereb Cortex*, 5(5), 410-428.
- Karniel, A., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2002). Does the motor control system use multiple models and context switching to cope with a variable environment? *Exp Brain Res*, 143(4), 520-524.
- Khan, M. A., Elliot, D., Coull, J., Chua, R., & Lyons, J. (2002). Optimal control strategies under different feedback schedules: Kinematic evidence. *J Mot Behav*, 34(1), 45-57.
- Khan, M. A., Lawrence, G., Fourkas, A., Franks, I. M., Elliott, D., & Pembroke, S. (2003). Online versus offline processing of visual feedback in the control of movement amplitude. *Acta Psychol (Amst)*, 113(1), 83-97.
- Krakauer, J. W., Ghez, C., & Ghilardi, M. F. (2005). Adaptation to visuomotor transformations: Consolidation, interference, and forgetting. *J Neurosci*, 25(2), 473-478.
- Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nat Neurosci*, 2(11), 1026-1031.
- Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., Mentis, M., Barnes, A., Veytsman, M., Eidelberg, D., et al. (2004). Differential cortical and subcortical activations in learning rotations and gains for reaching: A pet study. *J Neurophysiol*, 91(2), 924-933.

- Krakauer, J. W., Pine, Z. M., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (2000). Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *J Neurosci*, *20*(23), 8916-8924.
- Larish, D. D., Volp, C. M., & Wallace, S. A. (1984). An empirical note on attaining a spatial target after distorting the initial conditions of movement via muscle vibration. *J Mot Behav*, *16*(1), 76-83.
- Lhuisset, L., & Proteau, L. (2002). Developmental aspects of the control of manual aiming movements in aligned and non-aligned visual displays. *Exp Brain Res*, *146*(3), 293-306.
- Lhuisset, L., & Proteau, L. (2004). Planning and control of straight-ahead and angled planar movements in adults and young children. *Can J Exp Psychol*, *58*(4), 245-258.
- McIntyre, J., Stratta, F., & Lacquaniti, F. (1997). Viewer-centered frame of reference for pointing to memorized targets in three-dimensional space. *J Neurophysiol*, *78*(3), 1601-1618.
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Smith, J. E. (1988). Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements. *Psychol Rev*, *95*(3), 340-370.
- Meyer, D. E., Smith, J. E., & Wright, C. E. (1982). Models for the speed and accuracy of aimed movements. *Psychol Rev*, *89*(5), 449-482.
- Pine, Z. M., Krakauer, J. W., Gordon, J., & Ghez, C. (1996). Learning of scaling factors and reference axes for reaching movements. *Neuroreport*, *7*(14), 2357-2361.



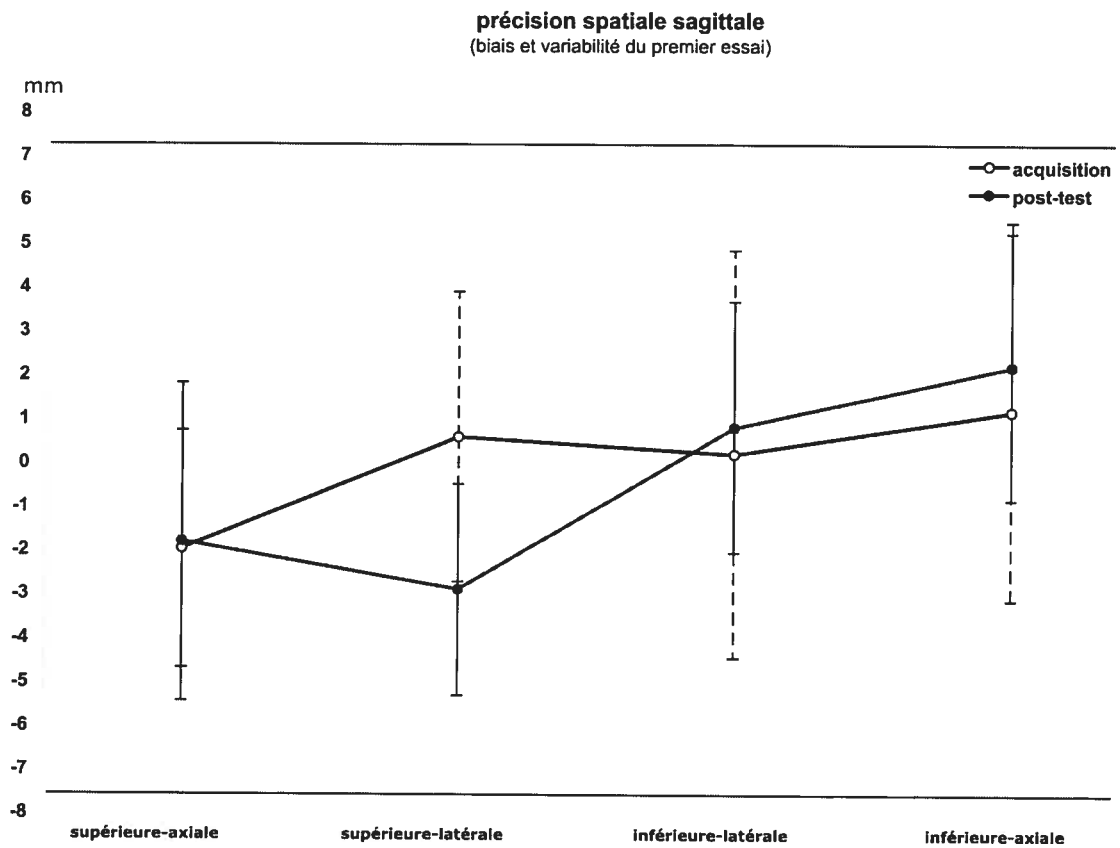
- Prablanc, C., Echallier, J. E., Jeannerod, M., & Komilis, E. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. II. Static and dynamic visual cues in the control of hand movement. *Biol Cybern*, 35(3), 183-187.
- Prablanc, C., & Martin, O. (1992). Automatic control during hand reaching at undetected two-dimensional target displacements. *J Neurophysiol*, 67(2), 455-469.
- Prablanc, C., Pelisson, D., & Goodale, M. A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand. *Exp Brain Res*, 62(2), 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(4), 441-456.
- 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(4), 367-384.
- Proteau, L., Martenuik, R., 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.
- Redding, G. M., Rossetti, Y., & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: A tutorial in theory and method. *Neurosci Biobehav Rev*, 29(3), 431-444.
- Redding, G. M., & Wallace, B. (2000). Prism exposure aftereffects and direct effects for different movement and feedback times. *J Mot Behav*, 32(1), 83-99.

- Robin, C., Blandin, Y., Toussaint, L., & Proteau, L. (2005). Specificity of learning in a video-aiming task: Modifying the salience of dynamic visual cues. *J Mot Behav*, *in press*.
- Rossetti, Y., Desmurget, M., & Prablanc, C. (1995). Vectorial coding of movement: Vision, proprioception, or both? *J Neurophysiol*, *74*(1), 457-463.
- 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*(2), 323-330.
- Sainburg, R. L., Lateiner, J. E., Latash, M. L., & Bagesteiro, L. B. (2003). Effects of altering initial position on movement direction and extent. *J Neurophysiol*, *89*(1), 401-415.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Bresciani, J. P., Bourdin, C., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (2003). Target and hand position information in the online control of goal-directed arm movements. *Exp Brain Res*, *151*(4), 524-535.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Vercher, J. L., Bresciani, J. P., Bourdin, C., & Gauthier, G. M. (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. *Exp Brain Res*, *157*(4), 468-471.
- Schmidt, R. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychol rev*, *82*(4), 225-260.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn, J. T., Jr. (1979). Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychol Rev*, *47*(5), 415-451.

- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989a). Errors in pointing are due to approximations in sensorimotor transformations. *J Neurophysiol*, 62(2), 595-608.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989b). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *J Neurophysiol*, 62(2), 582-594.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1992). Moving in three-dimensional space: Frames of reference, vectors, and coordinate systems. *Annu Rev Neurosci*, 15, 167-191.
- Stelmach, G. E., Goggin, N. L., & Amrhein, P. C. (1988). Aging and the restructuring of precued movements. *Psychol Aging*, 3(2), 151-157.
- Trick, G. L., & Silverman, S. E. (1991). Visual sensitivity to motion: Age-related changes and deficits in senile dementia of the alzheimer type. *Neurology*, 41(9), 1437-1440.
- Vindras, P., Desmurget, M., Prablanc, C., & Viviani, P. (1998). Pointing errors reflect biases in the perception of the initial hand position. *J Neurophysiol*, 79(6), 3290-3294.
- Wojciechowski, R., Trick, G. L., & Steinman, S. B. (1995). Topography of the age-related decline in motion sensitivity. *Optom Vis Sci*, 72(2), 67-74.
- Woodworth, R. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychol rev*, 3(suppl), 1-119.
- Yap, M., Brown, B., & Clarke, J. (1994). Reduction in stereoacuity with age and reduced retinal illuminance. *Ophthalmic Physiol Opt*, 14(3), 298-301.

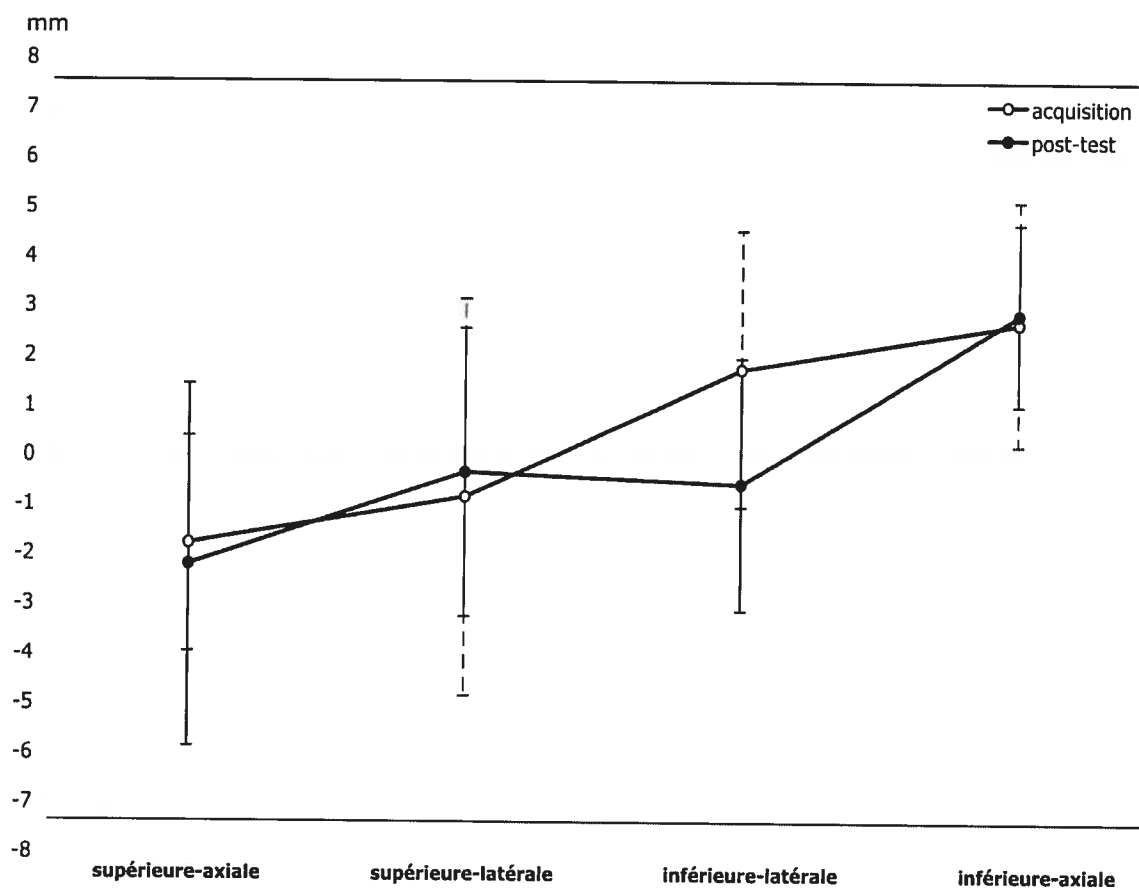
## Annexe A

**Figure 10.** Précision spatiale sagittale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 2.



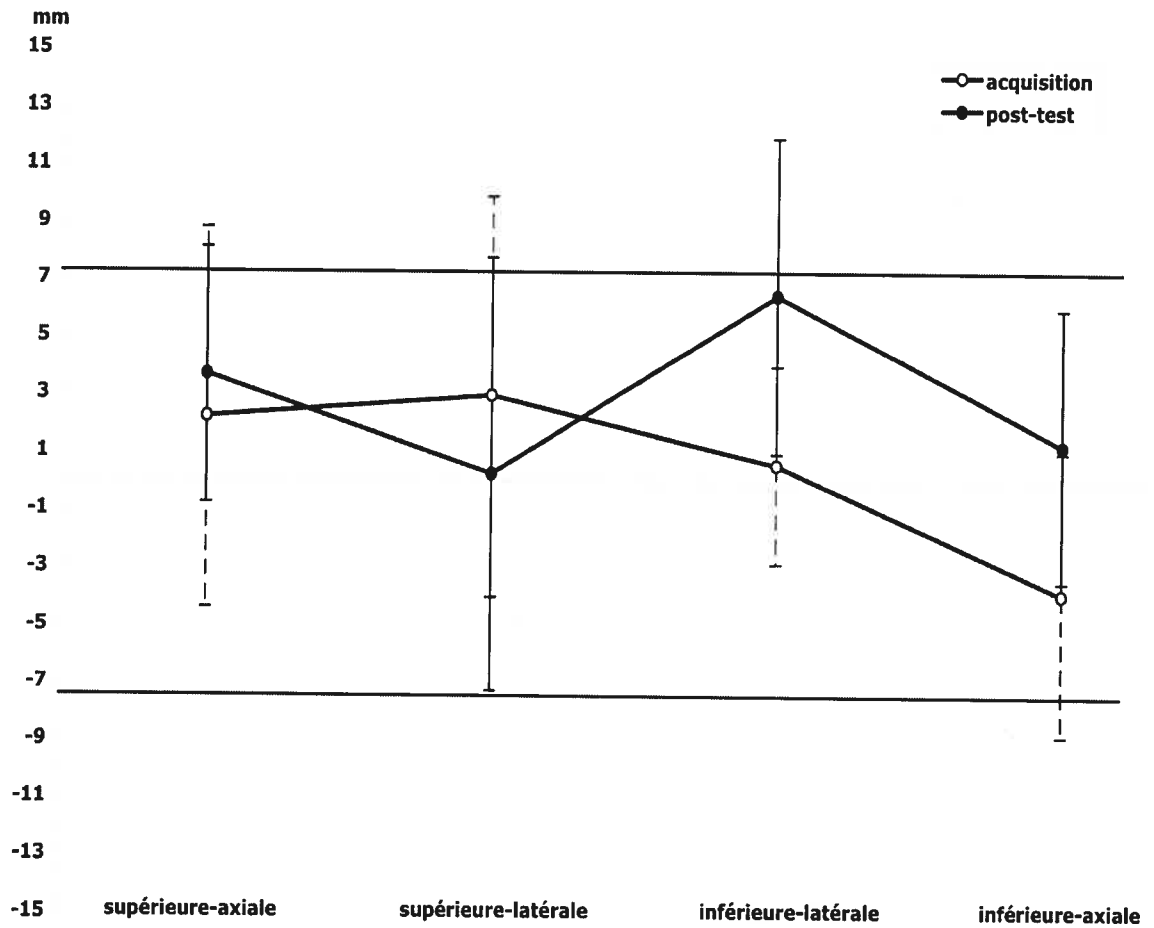
\* Les deux barres verticales représentent les limites spatiales utilisées pour définir que le mouvement avait terminé sur la cible pour la dimension considérée.

**Figure 11.** Précision spatiale latérale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 2.



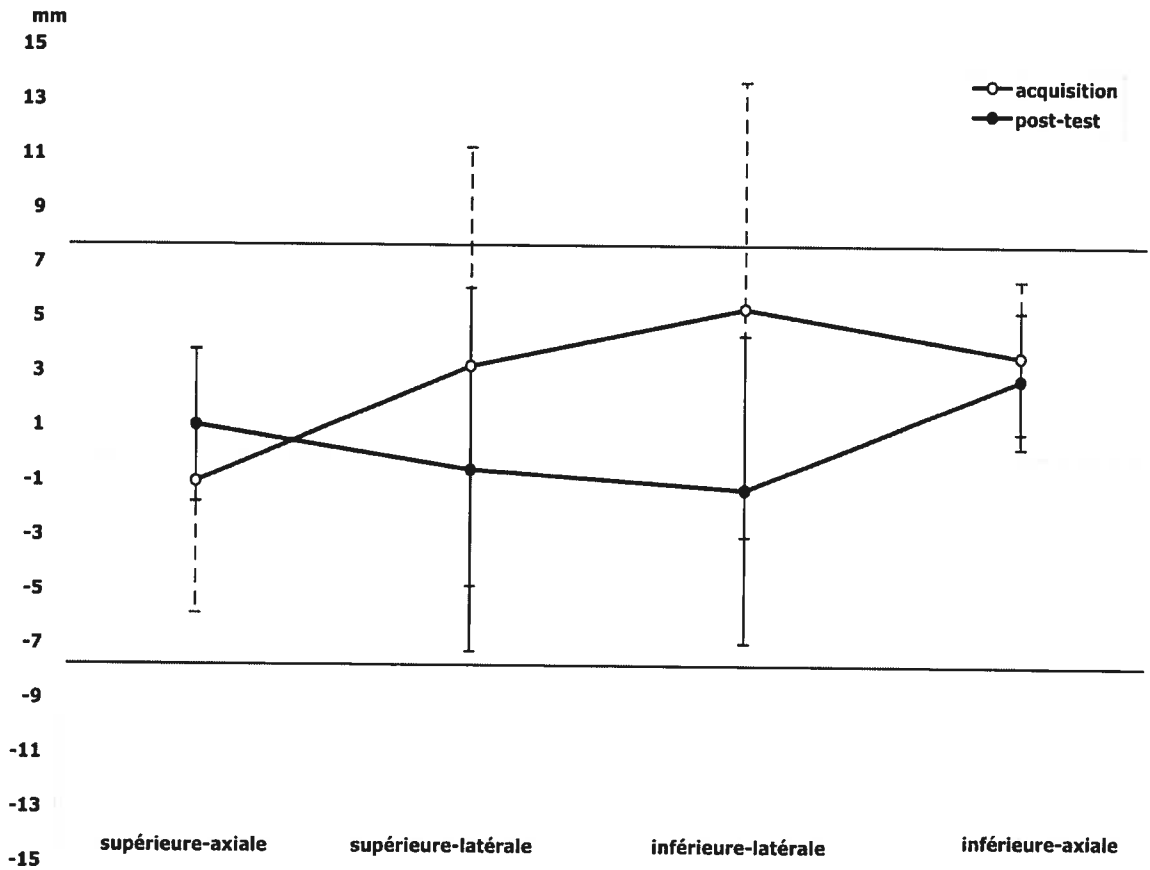
\* Les deux barres verticales représentent les limites spatiales utilisées pour définir que le mouvement avait terminé sur la cible pour la dimension considérée.

**Figure 12.** Précision spatiale sagittale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 3.



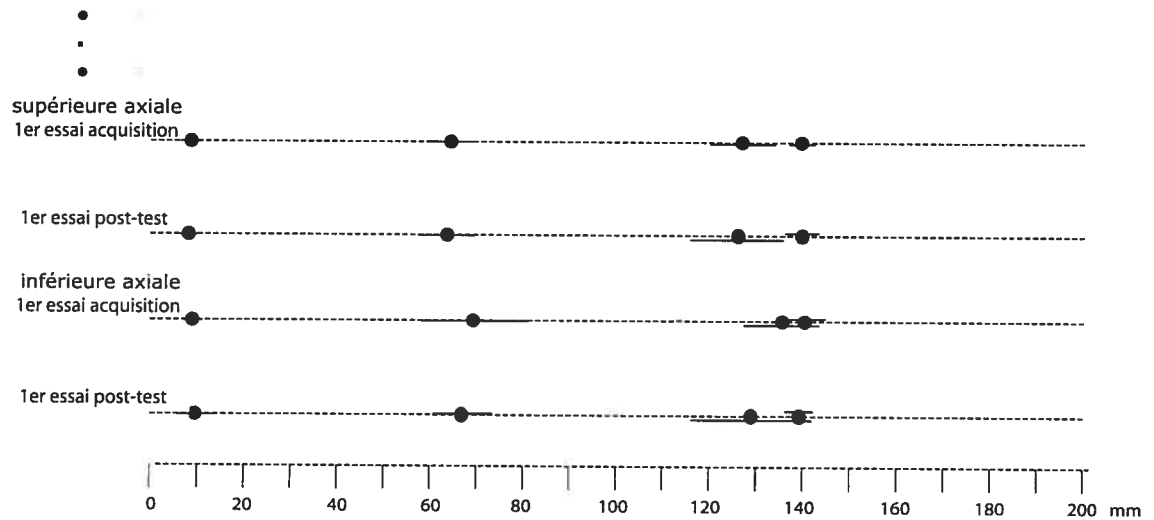
\* Les deux barres verticales représentent les limites spatiales utilisées pour définir que le mouvement avait terminé sur la cible pour la dimension considérée.

**Figure 13.** Précision spatiale latérale lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai des mouvements dirigés vers chacune des cibles durant l'expérience 3.

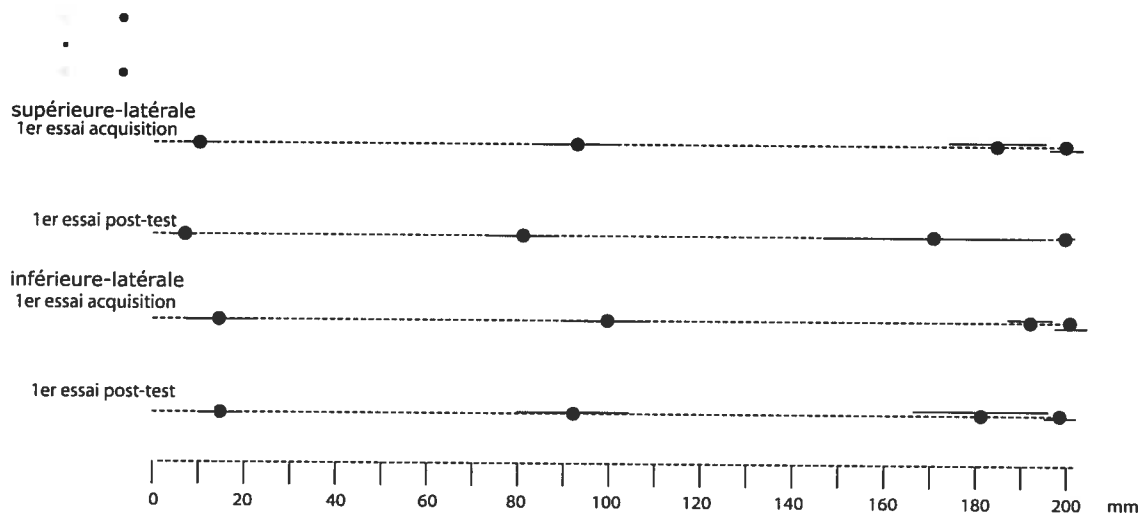


\* Les deux barres verticales représentent les limites spatiales utilisées pour définir que le mouvement avait terminé sur la cible pour la dimension considérée.

**Figure 14.** Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience 2 pour les cibles axiales.

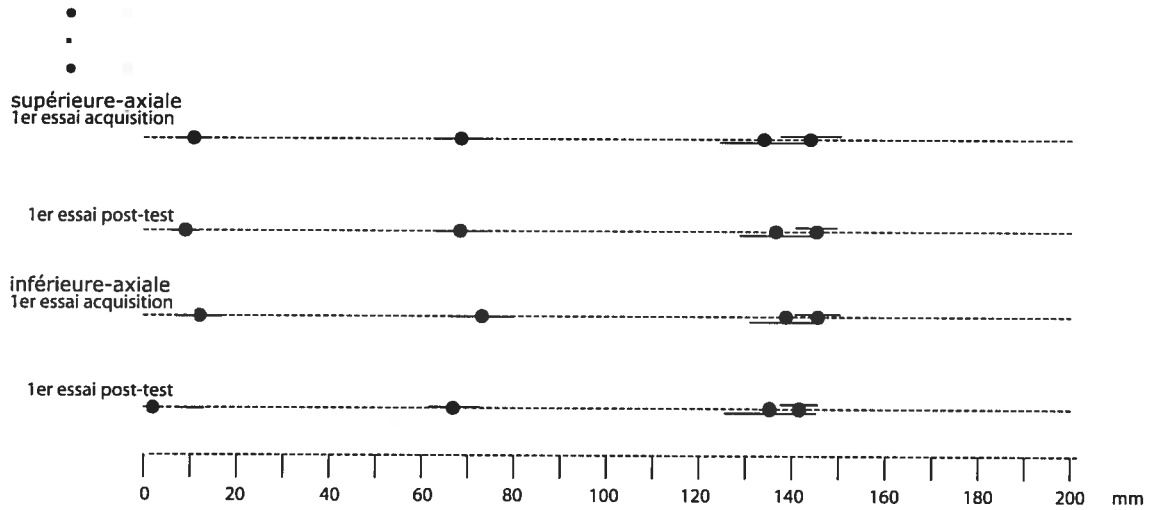


**Figure 15.** Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience 2 pour les cibles latérales.

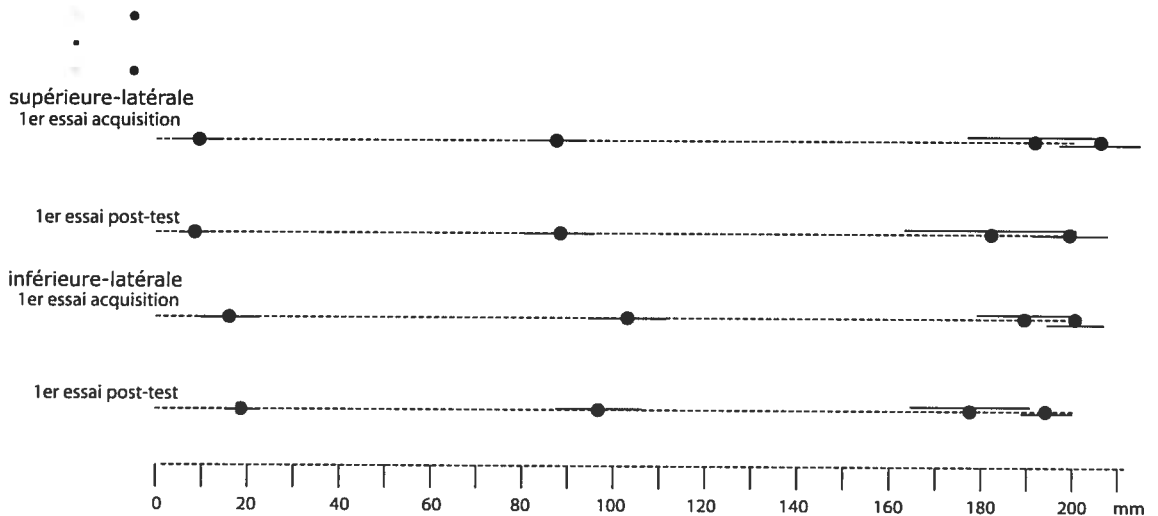




**Figure 16.** Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience 3 pour les cibles axiales.



**Figure 17.** Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques lors de l'acquisition (avec lunettes) et le post-test (sans lunettes) du groupe vision/distorsion. Précision spatiale obtenue pour le premier essai de chaque phase lors de l'expérience pour les cibles latérales.



**Tableau 3a.** Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle, des coefficients de variabilité et de la déviation du vecteur aux différents marqueurs cinématiques lors de l'expérience 3 durant les phases d'acquisition et de recouvrement. Valeurs obtenues pour les cibles latérales.

Cibles latérales

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin
<b>Groupes</b>	<b>Longueur du vecteur (mm)</b>			
VD	11.56	89.63	177.99	196.14
PL	10.25	86.93	176.78	195.57
VN	12.51	91.4	177.28	196.18
	<b>Biais du vecteur</b>			
VD	-0.64	-1.74	-0.2	0.34
PL	0.73	-1.35	-0.17	1.13
VN	-3.14	-1.25	0.04	0.5
	<b>Variabilité du vecteur</b>			
VD	10.59	2.58	1.67	1.38
PL	14.55	2.58	1.5	1.22
VN	9	2.47	1.6	1.34
	<b>Valeur absolue de la déviation du vecteur</b>			
VD	8.88	3.15	1.56	1.32
PL	11.69	3.01	1.37	1.13
VN	9.14	3.26	1.53	1.32
	<b>Coefficient de variabilité</b>			
VD	0.36	0.07	0.07	0.02
PL	0.37	0.09	0.06	0.02
VN	0.37	0.08	0.07	0.02
	<b>Occurrence temporelle (ms)</b>			
VD	98.04	199.78	320.06	461.01
PL	97.48	194.77	312.1	455.89
VN	100.27	200.14	312.21	453.78

**Tableau 3b.** Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle, des coefficients de variabilité et de la déviation du vecteur aux différents marqueurs cinématiques lors de l'expérience 3 durant les phases d'acquisition et de recouvrement. Valeurs obtenues pour les cibles axiales.

Cibles axiales

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin
<b>Groupes</b>	<b>Longueur du vecteur (mm)</b>			
VD	7.84	62.40	125.36	137.17
PL	7.73	62.24	124.46	137.21
VN	8.98	64.78	126.98	137.99
	<b>Biais du vecteur</b>			
VD	2.44	0.83	0.55	0.57
PL	2.19	0.44	0.38	0.37
VN	3.2	1.24	0.56	0.51
	<b>Variabilité du vecteur</b>			
VD	8.14	2.28	1.47	1.27
PL	10.78	2.46	1.39	1.17
VN	7.84	2.23	1.39	1.15
	<b>Valeur absolue de la déviation du vecteur</b>			
VD	8.45	2.56	1.5	1.31
PL	11.42	2.55	1.41	1.21
VN	8.02	2.83	1.47	1.25
	<b>Coefficient de variabilité</b>			
VD	0.36	0.09	0.07	0.02
PL	0.31	0.09	0.08	0.02
VN	0.35	0.08	0.06	0.02
	<b>Occurrence temporelle (ms)</b>			
VD	95.89	186.37	298.63	434.70
PL	97.29	185.06	293.07	431.74
VN	98.81	189.02	294.89	427.10

**Tableau 4.** Synthèse de la précision spatiale des cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).

Cibles latérales

	Acquisition tard	Post-test
<b>Groupes</b>	<b>Erreur constante latérale</b>	
VD	0.94	1.31
PL	0.73	-0.96
VN	0.03	-0.21
	<b>Erreur variable latérale</b>	
VD	6.62	5.99
PL	5.33	5.63
VN	6.63	8.14
	<b>Erreur constante sagittale</b>	
VD	-1.29	-0.46
PL	-0.75	-0.49
VN	-2.55	-1.85
	<b>Erreur variable sagittale</b>	
VD	5.29	4.72
PL	5.34	4.28
VN	5.57	5.71
	<b>Temps de mouvement</b>	
VD	454.68	448.92
PL	458.17	453.70
VN	445.91	450.73

Tableau 4.(suite).

## Cibles axiales

	Acquisition tard	Post-test
Groupes	Erreur constante latérale	
VD	1.35	1.75
PL	0.67	0.95
VN	1.31	-0.21
	Erreur variable latérale	
VD	3.15	2.68
PL	2.32	2.69
VN	3.03	3.69
	Erreur constante sagittale	
VD	-0.95	-1.02
PL	-0.43	-1.63
VN	-1.31	1.33
	Erreur variable sagittale	
VD	4.71	4.18
PL	4.86	4.08
VN	4.52	5.50
	Temps de mouvement	
VD	425.13	421.52
PL	431.13	430.70
VN	424.58	423.76

**Tableau 5a.** Occurrence spatiale aux différents marqueurs cinématiques pour les cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).

**Cible supérieure-axiale**

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	Acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	15.50 ± 8.38	18.49 ± 8.78	37.71 ± 11.06	40.42 ± 13.45	75.48 ± 12.78	74.80 ± 15.34	139.92 ± 3.42	140.80 ± 2.98
PL	17.29 ± 6.33	18.85 ± 10.84	41.29 ± 8.76	38.56 ± 15.09	79.00 ± 12.64	74.38 ± 15.70	139.94 ± 2.52	139.68 ± 3.10
VN	20.75 ± 8.80	17.00 ± 5.71	43.66 ± 15.35	42.79 ± 10.17	75.85 ± 16.58	73.97 ± 10.02	139.31 ± 3.38	139.90 ± 2.56

**Cible inférieure-axiale**

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	16.21 ± 11.46	14.36 ± 9.12	34.99 ± 11.86	36.72 ± 14.64	66.51 ± 12.06	68.93 ± 18.93	138.32 ± 1.30	137.42 ± 1.44
PL	12.67 ± 10.49	12.11 ± 7.55	31.97 ± 15.18	34.16 ± 12.36	62.41 ± 18.67	73.42 ± 11.42	138.96 ± 2.56	139.42 ± 3.20
VN	13.80 ± 11.47	11.03 ± 6.09	33.62 ± 14.25	32.10 ± 8.62	70.33 ± 12.64	70.18 ± 11.34	138.18 ± 2.17	137.70 ± 1.48

Tableau 5a. (suite).

## Cible supérieure latérale

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	10.54 ± 5.07	10.32 ± 4.03	104.65 ± 10.42	100.30 ± 7.39	190.58 ± 9.2	188.02 ± 7.51	200.54 ± 7.51	200.57 ± 4.50
PL	8.21 ± 2.44	9.81 ± 3.05	99.98 ± 12.1	101.24 ± 11.85	187.89 ± 11.34	189.38 ± 7.04	199.99 ± 4.90	196.24 ± 5.31
VN	10.56 ± 3.65	9.88 ± 3.91	103.72 ± 11.69	101.71 ± 10.91	188.45 ± 5.33	189.30 ± 5.21	197.99 ± 4.14	197.13 ± 3.86

## Cible inférieure-latérale

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	15.02 ± 4.97	17.66 ± 6.24	97.70 ± 7.62	102.24 ± 8.41	180.93 ± 8.05	184.10 ± 8.79	195.16 ± 3.65	196.76 ± 4.18
PL	13.28 ± 2.47	13.53 ± 3.15	92.54 ± 6.38	95.32 ± 5.52	183.73 ± 8.68	180.10 ± 8.77	196.53 ± 3.22	196.24 ± 3.61
VN	16.68 ± 4.03	15.62 ± 4.01	97.93 ± 5.94	98.34 ± 4.88	182.84 ± 3.40	184.00 ± 4.57	194.60 ± 2.88	194.82 ± 4.20

**Tableau 5b.** Occurrence temporelle aux différents marqueurs cinématiques pour les cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).

**Cible supérieur-axiale**

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	106.55 ± 11.58	107.63 ± 8.18	216.99 ± 20.63	212.81 ± 12.50	329.70 ± 27.31	319.71 ± 20.43	460.61 ± 20.14	444.38 ± 14.16
PL	101.81 ± 7.66	102.74 ± 9.42	206.33 8.55	210.63 ± 8.02	332.88 ± 27.82	325.74 ± 17.13	460.63 ± 16.82	460.25 ± 17.59
VN	108.69 ± 10.04	108.30 ± 11.15	213.56 ± 11.71	215.59 ± 12.73	324.88 ± 15.96	329.45 ± 16.46	449.13 ± 16.23	454.35 ± 18.83

**Cible inférieure-axiale**

Groupe	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	89.30 ± 16.95	96.66 ± 19.29	130.09 ± 21.45	140.10 ± 21.51	178.33 ± 27.25	189.48 ± 27.45	397.28 ± 54.84	405.03 ± 29.62
PL	94.65 ± 24.43	94.39 ± 23.35	134.59 ± 26.07	141.97 ± 24.37	183.48 ± 27.83	201.80 ± 19.56	426.33 ± 14.73	427.66 ± 14.54
VN	94.08 ± 27.51	90.44 ± 14.14	142.15 ± 22.66	139.20 ± 11.82	200.21 ± 20.24	195.96 ± 14.53	425.21 ± 16.46	418.21 ± 14.79



Tableau 5b.(suite).

## Cible supérieure-latérale

Groupe	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	95.93 ± 11.70	93.19 ± 11.27	213.48 ± 22.71	199.51 ± 15.32	331.11 ± 22.38	313.73 ± 21.94	448.76 ± 18.81	430.05 ± 19.73
PL	90.30 ± 7.66	93.95 ± 8.68	207.68 ± 16.01	208.01 ± 13.83	334.72 ± 29.88	335.55 ± 23.45	455.71 ± 23.26	447.78 ± 18.63
VN	95.36 ± 8.86	95.36 ± 9.86	210.79 ± 19.60	209.21 ± 18.65	324.84 ± 17.33	328.92 ± 22.97	442.69 ± 14.96	440.34 ± 16.91

## Cible inférieure-latérale

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	106.55 ± 11.58	107.63 ± 8.18	216.99 ± 20.63	212.81 ± 12.50	329.70 ± 27.31	319.71 ± 20.43	460.61 ± 20.14	444.38 ± 14.16
PL	101.81 ± 7.66	102.74 ± 9.42	206.33 ± 8.55	210.63 ± 8.02	332.88 ± 27.82	325.74 17.13	460.63 ± 16.82	460.25 ± 17.59
VN	108.69 ± 10.04	108.30 ± 11.15	213.56 ± 11.71	215.59 ± 12.73	324.88 ± 15.96	329.45 16.46	449.13 ± 16.23	454.35 ± 18.83

Tableau 5c. Coefficients de variabilité aux différents marqueurs cinématiques pour les cibles latérales et axiales lors la phase d'acquisition et du post-test sans lunettes des groupes qui bénéficiaient de la vision dynamique (expérience 3).

Cible supérieure-axiale

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.03	0.02
PL	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.02	0.02
VN	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.02	0.02

Cible inférieure-axiale

Groupes	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	0.11	0.14	0.05	0.06	0.05	0.05	0.02	0.02
PL	0.12	0.12	0.05	0.05	0.05	0.04	0.01	0.02
VN	0.13	0.12	0.05	0.05	0.05	0.04	0.02	0.02

Tableau 5c (suite).

## Cible supérieure-latérale

Groupe	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	0.25	0.25	0.08	0.08	0.06	0.06	0.04	0.04
PL	0.22	0.25	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03
VN	0.32	0.25	0.07	0.07	0.06	0.03	0.04	0.03

## Cible inférieure-latérale

Groupe	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin	
	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test	acquisition	post-test
VD	0.22	0.24	0.05	0.06	0.04	0.04	0.03	0.02
PL	0.18	0.20	0.05	0.05	0.04	0.05	0.03	0.02
VN	0.26	0.19	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03

## Annexes B

Tableau 2a. Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les participants jeunes et âgés de la condition statique (condition sans lunettes)

## Occurrence spatiale

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	7.81 ± 1.87	9.37 ± 3.83	74.30 ± 3.80	74.51 ± 6.36	149.52 ± 7.01	153.19 ± 7.44	166.85 ± 1.24	168.02 ± 2.48
Inférieure-latérale	16.64 ± 4.13	9.70 ± 2.83	85.55 ± 8.44	72.88 ± 3.83	154.99 ± 4.96	145.23 ± 8.57	167.19 ± 0.99	167.55 ± 0.86

## Occurrence temporelle

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	88.22 ± 5.42	93.06 ± 15.04	180.38 ± 5.53	185.69 ± 17.64	278.44 ± 9.13	300.39 ± 31.84	417.19 ± 18.73	434.38 ± 25.37
Inférieure-latérale	110.39 ± 16.24	93.85 ± 9.39	209.72 ± 20.03	198.21 ± 11.88	314.71 ± 21.10	315.29 ± 19.77	442.11 ± 22.94	472.47 ± 19.24

## Coefficient de variabilité

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	0.30	0.44	0.05	0.08	0.04	0.07	0.02	0.02
Inférieure-latérale	0.27	0.39	0.05	0.10	0.04	0.10	0.02	0.02

**Tableau 2b.** Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les participants jeunes et âgés de la condition statique (condition avec lunettes)

#### Occurrence spatiale

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	7.52 ± 2.83	8.69 ± 2.97	74.93 ± 5.98	76.28 ± 4.74	151.44 ± 6.16	151.71 ± 6.56	167.28 ± 2.22	168.69 ± 1.88
Inférieure-latérale	14.70 ± 3.07	11.52 ± 3.09	84.31 ± 6.20	77.00 ± 4.66	154.50 ± 7.56	149.60 ± 6.65	168.28 ± 1.68	167.99 ± 1.27

#### Occurrence temporelle

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	87.57 ± 6.73	90.16 ± 7.32	181.46 ± 8.51	180.99 ± 9.67	281.73 ± 21.68	283.10 ± 15.64	415.10 ± 18.55	421.02 ± 16.06
Inférieure-latérale	105.94 ± 10.99	100.37 ± 12.48	206.19 ± 16.72	200.97 ± 13.39	309.93 ± 20.13	314.16 ± 29.59	441.14 ± 19.47	461.51 ± 22.89

#### Coefficient de variabilité

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	0.31	0.44	0.05	0.08	0.04	0.07	0.02	0.02
Inférieure-latérale	0.34	0.33	0.06	0.09	0.06	0.10	0.02	0.02

**Tableau 3a.** Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les participants jeunes et âgés de la condition dynamique (condition sans lunettes).

#### Occurrence spatiale

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	5.66 ± 2.37	8.02 ± 2.56	79.28 ± 5.12	78.23 ± 6.05	155.60 ± 5.26	151.34 ± 7.79	167.06 ± 1.35	168.34 ± 1.82
Inférieure-latérale	16.69 ± 3.46	12.03 ± 4.07	89.10 ± 7.58	79.52 ± 4.97	160.11 ± 2.92	146.32 ± 8.18	167.49 ± 1.66	167.96 ± 2.01

#### Occurrence temporelle

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	78.2 ± 9.0	83.27 ± 6.16	201.0 ± 14.3	205.92 ± 24.75	314.9 ± 19.7	330.51 ± 41.59	437.7 ± 17.6	476.02 ± 34.23
Inférieure-latérale	111.0 ± 21.3	105.11 ± 13.45	224.6 ± 26.5	224.73 ± 24.58	341.8 ± 24.1	341.72 ± 36.69	455.6 ± 19.3	505.45 ± 30.11

#### Coefficient de variabilité

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	0.43	0.59	0.08	0.08	0.05	0.07	0.02	0.02
Inférieure-latérale	0.25	0.35	0.07	0.09	0.03	0.10	0.02	0.02

**Tableau 3b.** Synthèse de l'occurrence spatiale et temporelle (moyenne et écart-type) ainsi que les coefficients de variabilité à chaque pic cinématique pour les participants jeunes et âgés de la condition dynamique (condition avec lunettes).

#### Occurrence spatiale

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	6.57 ± 1.17	10.86 ± 3.90	79.71 ± 6.77	83.62 ± 6.12	151.77 ± 5.02	154.10 ± 6.95	166.82 ± 1.74	168.55 ± 2.18
Inférieure-latérale	17.17 ± 4.66	13.75 ± 5.22	90.02 ± 10.33	82.28 ± 6.10	157.43 ± 6.24	151.52 ± 5.81	169.12 ± 1.55	169.04 ± 2.86

#### Occurrence temporelle

Cibles	Accélération		Vélocité		Décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	81.9 ± 4.3	95.06 ± 7.90	201.7 ± 13.2	210.85 ± 22.07	306.6 ± 13.6	322.66 ± 47.63	442.8 ± 15.3	460.84 ± 43.52
Inférieure-latérale	112.4 ± 20.4	108.60 ± 19.23	230.8 ± 30.9	233.07 ± 27.27	342.4 ± 35.5	361.89 ± 45.29	466.2 ± 20.8	505.64 ± 42.49

#### Coefficient de variabilité

Cibles	Accélération		vélocité		décélération		Fin de mouvement	
	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés	jeunes	âgés
Supérieure-latérale	0.45	0.39	0.07	0.07	0.05	0.07	0.02	0.02
Inférieure-latérale	0.32	0.28	0.07	0.09	0.05	0.10	0.02	0.02

**Tableau 5a:** Tableau de synthèse de la précision spatiale, des temps de mouvement et de l'occurrence spatiale des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation fovéale. Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont présentées.

**Condition vision-normale**

	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
Cibles					
3	2.50	5.13	1.38	4.34	437.56
5	1.79	5.00	0.56	5.73	452.13
7	1.36	5.08	1.43	3.98	456.98
9	0.58	6.18	-0.68	3.86	457.53

	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
Cibles					
4	1.05	2.16	0.68	5.38	399.50
6	0.75	2.53	1.40	4.79	418.71
8	1.75	2.88	-1.12	4.37	415.76
10	1.70	3.31	-1.38	4.30	419.73

**Condition vision-normale (occurrence spatiale)**

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles				
3	11.29 ± 2.53	83.53 ± 7.10	160.02 ± 6.29	172.70 ± 2.85
5	14.02 ± 3.61	88.16 ± 6.83	171.79 ± 5.60	184.28 ± 4.53
7	14.04 ± 3.07	88.13 ± 7.10	176.48 ± 6.05	190.11 ± 4.75
9	15.99 ± 4.46	90.56 ± 7.69	180.72 ± 8.03	193.74 ± 6.60



Tableau 5a. (suite).

## Condition vision-normale (occurrence spatiale)

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles				
4	9.14 ± 3.01	62.77 ± 4.26	114.32 ± 6.04	120.67 ± 4.98
6	9.07 ± 3.71	67.84 ± 4.87	124.31 ± 5.02	130.40 ± 2.41
8	8.68 ± 2.63	67.60 ± 3.45	123.38 ± 5.00	131.84 ± 3.40
10	9.96 ± 3.20	69.21 ± 5.63	129.36 ± 5.07	135.70 ± 3.39

## Condition cible-seule

	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
Cibles					
3	9.45	7.70	10.79	7.24	454.20
5	3.05	11.16	6.19	9.25	457.51
7	4.72	9.38	8.62	7.37	458.64
9	1.44	8.90	5.21	8.16	460.22

	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
Cibles					
4	9.19	4.88	-8.58	9.52	427.51
6	8.59	4.61	-11.30	10.70	435.91
8	8.87	4.45	8.44	12.67	430.11
10	8.25	4.39	6.74	10.08	431.68

Tableau 5a (suite).

## Condition cible-seule (occurrence spatiale)

Cibles	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
3	14.25 ± 3.49	91.06 ± 6.32	173.32 ± 10.25	184.19 ± 9.13
5	12.81 ± 4.78	97.34 ± 8.72	176.98 ± 12.31	189.16 ± 9.28
7	15.05 ± 5.40	100.29 ± 10.05	185.89 ± 13.26	197.64 ± 9.50
9	13.24 ± 4.11	99.70 ± 11.66	187.17 ± 11.55	198.63 ± 10.98
4	7.99 ± 3.55	67.39 ± 6.26	121.73 ± 10.70	129.17 ± 9.91
6	9.42 ± 3.66	73.08 ± 5.21	131.92 ± 8.68	140.73 ± 7.90
8	8.92 ± 3.81	73.61 ± 8.21	133.60 ± 10.39	141.93 ± 8.73
10	10.51 ± 5.26	73.34 ± 8.04	133.93 ± 9.79	144.34 ± 8.67

**Tableau 5b.** Tableau de synthèse l'occurrence temporelle des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation périphérique. Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont présentées.

Condition vision-normale

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles				
3	101.09 ± 8.81	208.99 ± 16.86	316.66 ± 25.51	437.56 ± 19.12
5	109.74 ± 9.86	214.09 ± 17.14	327.91 ± 24.56	452.13 ± 21.56
7	110.20 ± 8.46	212.82 ± 13.28	331.21 ± 28.53	456.98 ± 20.65
9	112.64 ± 9.34	211.98 ± 16.84	329.20 ± 23.75	457.53 ± 19.39
4	103.56 ± 11.03	197.03 ± 13.19	284.87 ± 21.96	399.50 ± 18.54
6	102.42 ± 11.98	205.79 ± 14.80	305.00 ± 20.96	418.71 ± 18.47
8	101.04 ± 8.77	201.97 ± 12.36	293.33 ± 21.01	415.76 ± 18.65
10	105.56 ± 10.32	202.56 ± 12.19	303.98 ± 22.90	419.73 ± 21.29

Tableau 5b (suite).

## Condition cible-seule

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles				
3	100.36 ± 9.26	218.18 ± 12.39	334.20 ± 21.43	454.20 ± 21.60
5	104.78 ± 14.32	222.51 ± 15.62	333.38 ± 30.38	457.51 ± 28.90
7	111.44 ± 12.58	221.87 ± 12.86	334.27 ± 21.77	458.64 ± 24.87
9	106.62 ± 10.66	221.40 ± 14.57	338.00 ± 28.07	460.22 ± 25.31
4	99.27 ± 15.55	211.40 ± 20.33	309.87 ± 31.90	427.51 ± 28.05
6	103.91 ± 12.74	213.07 ± 16.73	311.04 ± 33.18	435.91 ± 32.31
8	102.76 ± 14.29	212.08 ± 19.56	312.15 ± 31.34	430.11 ± 25.66
10	108.19 ± 17.34	210.39 ± 21.30	308.93 ± 19.90	431.68 ± 24.92

**Tableau 8a.** Tableau de synthèse de la précision spatiale, des temps de mouvement et de l'occurrence spatiale des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation fovéale. Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont présentées.

#### Condition vision-normale

Cibles	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
3	0.87	3.35	0.62	3.25	453.76
5	0.26	2.84	0.86	2.26	460.50
7	-0.36	2.76	0.38	2.45	460.86
9	1.12	2.58	0.74	2.51	472.06

Cibles	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
4	1.21	2.08	-0.57	2.53	412.10
6	0.89	1.94	-0.18	2.78	431.92
8	0.85	1.53	-1.34	2.89	433.28
10	1.40	1.63	-0.79	2.94	443.66

#### Occurrence spatiale

Cible	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
3	12.30 ± 3.67	77.25 ± 5.94	155.75 ± 7.98	170.46 ± 2.09
5	12.25 ± 3.83	80.02 ± 7.64	167.27 ± 5.00	183.06 ± 1.31
7	11.46 ± 3.32	82.96 ± 7.05	174.01 ± 8.31	188.27 ± 2.68
9	12.21 ± 3.94	86.12 ± 7.76	177.61 ± 8.80	195.21 ± 2.32

Tableau 8a .(suite).

## Occurrence spatiale (condition vision-normale)

Cible	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
4	7.87 ± 2.56	57.44 ± 2.58	109.20 ± 4.44	119.62 ± 1.48
6	8.28 ± 2.07	58.60 ± 4.93	120.27 ± 5.27	128.90 ± 1.24
8	8.58 ± 3.01	63.09 ± 3.14	119.42 ± 5.43	131.81 ± 1.11
10	9.45 ± 2.92	62.12 ± 5.57	122.55 ± 7.88	136.62 ± 1.54

## Condition cible-seule

Cibles	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
3	7.15	11.81	7.44	7.74	454.87
5	0.32	10.21	4.07	8.50	453.27
7	0.11	8.30	3.28	8.81	460.78
9	0.16	10.14	1.57	7.64	461.82

Cibles	EC latérale	EV latérale	EC sagittale	EV sagittale	TM
4	7.43	4.96	-9.44	-8.64	425.73
6	6.43	5.79	6.85	10.14	430.80
8	4.89	7.46	5.23	12.05	440.51
10	7.48	4.87	6.38	11.99	435.98

Tableau 8a.(suite).

Condition cible-seule (occurrence spatiale)

Cibles	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
3	12.40 ± 5.17	91.93 ± 9.73	170.08 ± 8.49	180.27 ± 10.19
5	14.03 ± 3.69	97.95 ± 6.18	175.53 ± 7.12	185.68 ± 8.07
7	13.22 ± 4.85	97.83 ± 7.90	179.81 ± 9.98	190.63 ± 8.91
9	16.41 ± 4.46	101.45 ± 7.43	185.26 ± 9.00	195.10 ± 9.11
4	8.92 ± 5.15	65.71 ± 8.03	120.53 ± 8.42	129.00 ± 7.99
6	8.92 ± 3.43	70.31 ± 8.14	127.37 ± 11.34	136.26 ± 10.82
8	11.50 ± 4.26	70.24 ± 7.15	129.37 ± 10.49	138.60 ± 8.76
10	12.42 ± 5.97	74.79 ± 7.06	134.38 ± 6.71	143.71 ± 6.15

**Tableau 8b.** Tableau de synthèse l'occurrence temporelle des cibles inférieures initiales et de leurs cibles secondaires lors du protocole de localisation périphérique. Les données des groupes vision-normale et cible-seule sont présentées.

Condition vision-normale

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles				
3	103.14 ± 10.19	200.40 ± 7.46	325.20 ± 26.82	453.76 ± 10.94
5	105.24 ± 8.88	202.54 ± 13.24	328.36 ± 23.07	460.50 ± 18.94
7	103.46 ± 8.21	204.80 ± 11.94	334.60 ± 20.08	460.86 ± 12.50
9	105.06 ± 9.91	208.62 ± 11.81	336.96 ± 17.18	472.06 ± 16.41
4	99.56 ± 9.48	189.60 ± 11.99	284.66 ± 22.50	412.10 ± 15.10
6	98.98 ± 8.01	193.20 ± 7.94	313.60 ± 24.76	431.92 ± 21.19
8	102.20 ± 10.42	200.32 ± 13.35	301.02 ± 21.98	433.28 ± 16.03
10	104.74 ± 8.87	196.84 ± 11.92	308.12 ± 24.54	443.66 ± 17.15



Tableau 8b (suite).

Cible-seule

	Accélération	Vélocité	Décélération	Fin de mouvement
Cibles				
3	101.42 ± 14.40	219.84 ± 22.36	337.00 ± 35.02	454.87 ± 29.01
5	106.02 ± 11.55	223.87 ± 16.61	332.91 ± 17.40	453.27 ± 14.96
7	105.71 ± 13.18	223.31 ± 16.06	340.22 ± 30.16	460.78 ± 25.56
9	114.24 ± 14.32	228.64 ± 19.90	344.40 ± 25.34	461.82 ± 16.05
4	101.58 ± 17.34	204.42 ± 24.40	301.31 ± 35.94	425.73 ± 29.06
6	99.56 ± 13.081	209.89 ± 15.98	306.20 ± 22.53	430.80 ± 22.24
8	108.18 ± 13.71	209.82 ± 18.80	310.44 ± 34.47	440.51 ± 33.65
10	112.09 ± 15.85	213.40 ± 17.79	309.07 ± 16.03	435.98 ± 17.33

