

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE PRESENTE A  
L'UNIVERSITE DU QUEBEC A TROIS-RIVIERES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA  
MAITRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITE PHYSIQUE

par

JEAN-PIERRE PELLERIN

CONTROLE DE LA MOTRICITE: INDICES ELECTROMYOGRAPHIQUES  
DE LA PLANIFICATION DE LA POSITION SEGMENTAIRE TERMINALE

OCTOBRE 1987

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## RESUME

Plusieurs auteurs ont soulevé l'hypothèse que certains mouvements sont préparés en fonction de la position terminale anticipée, c'est-à-dire la localisation spatiale finale du membre (MacNeilage, 1970) ou le point de l'espace défini par l'équilibre des rapports longueur/tension des muscles agonistes et antagonistes (Feldman, 1974; Bizzi, Dev, Morasso et Polit, 1978). Le but de cette étude est de déterminer si la connaissance préalable de la position terminale est une information sur laquelle se construit le programme moteur tel que reflété par l'organisation du patron triphasique des muscles agonistes et antagonistes dans un mouvement d'atteinte d'une cible planifiée ou d'une cible imprévue. Sept sujets exécutent des mouvements de flexion de l'épaule dans le plan horizontal vers des cibles situées à 70, 85 et 100 degrés de la position de départ. Le mouvement doit être le plus rapide possible et doit être précis à 4 degrés près. Dans une condition contrôle, les sujets exécutent 21 mouvements vers chacune des cibles alors qu'ils savent que la position de la cible initialement annoncée ne se modifiera pas durant l'exécution. Dans la condition expérimentale, 87 mouvements sont exécutés vers chacune des cibles. Toutefois, 15% des cibles initialement présentées sont modifiées en faveur d'une des deux autres cibles alors appelées cibles effectives. Une modification de cible ne peut se produire qu'au moment où le membre a franchi une distance d'un degré depuis la position de

départ. L'activité électromyographique (EMG) du muscle agoniste grand pectoral et du muscle antagoniste deltoïde postérieur est recueillie au moyen d'électrodes de surface. D'un potentiomètre situé à l'articulation de l'épaule sont recueillies les données de déplacement à partir desquelles sont dérivés les tracés de vitesse et d'accélération. Les résultats obtenus suggèrent qu'une connaissance préalable, c'est-à-dire avant l'amorce du mouvement, de la position terminale influence la planification des paramètres du mouvement. Trois paramètres se montrent largement influencés par la planification initiale: (a) l'activité agoniste initiale qui détermine la vitesse angulaire du mouvement, l'amplitude et la durée de l'accélération du mouvement, (b) le moment d'entrée en action de l'antagoniste et (c) le moment de décélération maximale du mouvement. La phase de l'accélération du mouvement se déroule davantage selon la planification initiale alors que la phase de la décélération montre des ajustements en cours de route, particulièrement en fonction d'une cible effective plus éloignée où la durée du mouvement est plus longue. La planification des paramètres du mouvement est plus évidente pour les mouvements à la cible rapprochée (70 degrés) que pour les mouvements longs (100 degrés). Nos résultats sont en contradiction avec l'hypothèse masse-ressort du contrôle du mouvement (Polit et Bizzi, 1978; Berkinblit, Feldman et Fickson, 1986). En effet, nos résultats indiquent que l'équilibre entre les activités musculaires agoniste et



antagoniste à la position terminale: (a) est atteint pour les mouvements à la cible plus rapprochée seulement, (b) n'est pas planifié sur la base de la connaissance préalable de la position terminale.

## REMERCIEMENTS

C'est maintenant le moment de souligner la contribution de différentes personnes sans lesquelles la réalisation de ce mémoire aurait été rendue plus difficile.

Tout d'abord, à monsieur Yves Girouard, Phd, mon directeur de mémoire, j'adresse mes plus sincères remerciements et ma plus profonde reconnaissance pour la qualité de sa méthodologie, son souci constant de l'exactitude, sa rigueur, son soutien, sa sagesse, sa grande disponibilité et ses qualités de communicateur. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à monsieur Louis Laurencelle, Phd, qui, par son ingéniosité et ses talents de méthodologiste vise constamment le développement de meilleurs instruments de mesure. La contribution de monsieur Laurencelle a été inestimable notamment au niveau de la programmation en temps réel et de ses judicieux commentaires lors de l'élaboration du projet. On ne peut que prendre en exemples des chercheurs d'une telle qualité.

Des remerciements s'adressent également à monsieur Claude Brouillette qui s'est brillamment occupé du volet technique du projet. La continuelle bonne humeur de monsieur Brouillette a constitué un atout essentiel face aux défis techniques que posait le projet. A monsieur Pierre Black, j'offre aussi des remerciements sincères pour toute l'aide apportée lors de la mise au point de l'expérience et pour tous les moments où, à l'improviste, il a su donner le petit

coup de main nécessaire.

A toutes ces personnes j'exprime ma vive reconnaissance pour leur aimable et précieux concours, ainsi que mon plaisir de les avoir cotoyées quotidiennement.

## TABLE DES MATIERES

	Page
RESUME . . . . .	i
REMERCIEMENTS. . . . .	iv
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	viii
LISTE DES FIGURES. . . . .	x
 CHAPITRES	
I. INTRODUCTION. . . . .	1
Hypothèse de la cible . . . . .	6
Modèle Masse-Ressort. . . . .	10
Patrons d'activité électromyographique. . . . .	16
Couple agoniste-antagoniste . . . . .	19
Problème. . . . .	32
 II. METHODOLOGIE. . . . .	35
Sujets. . . . .	35
Tâche du sujet. . . . .	35
Description du montage. . . . .	36
Procédures. . . . .	39
Séance d'entraînement . . . . .	40
Déroulement d'un essai. . . . .	40
Mesures . . . . .	41
Essais échantillonnés . . . . .	45
Analyse des résultats . . . . .	51
 III. RESULTATS . . . . .	53
Variables contrôles . . . . .	53
Pourcentage d'essais présentant une erreur de précision. . . . .	54
Pourcentage d'essais présentant une erreur de temps. . . . .	56
Temps de latence. . . . .	60
Temps de mouvement. . . . .	63
Vitesse angulaire moyenne . . . . .	66
Durée de l'accélération . . . . .	68
Durée de la décélération. . . . .	72
Moment de décélération maximale . . . . .	75
Moment d'entrée en action de l'antagoniste. . . . .	79
Racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste . . . . .	84
Racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG antagoniste. . . . .	93

	Ratio d'activité EMG agoniste/antagoniste .	102
	Durée de la bouffée initiale de l'agoniste.	114
	Durée de l'activité agoniste en phase pré-déplacement . . . . .	116
IV.	DISCUSSION. . . . .	121
	Temps de latence. . . . .	121
	Temps de mouvement et vitesse angulaire moyenne. . . . .	122
	Durée de l'accélération . . . . .	124
	Durée de la décélération. . . . .	125
	Moment de décélération maximale . . . . .	126
	Moment d'entrée en action de l'antagoniste.	128
	Racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste . . . . .	132
	Racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG antagoniste. . . . .	134
	Ratio d'activité EMG agoniste/antagoniste .	137
	Durée de la bouffée initiale de l'agoniste.	139
	Durée de l'activité agoniste en phase pré-déplacement . . . . .	140
	Conclusion. . . . .	142
ANNEXE		
	A: Tableaux des résultats. . . . .	151
	NOTE DE REFERENCE. . . . .	166
	REFERENCES . . . . .	167

## LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
1. Répartition du nombre d'essais selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . .	151
2. Pourcentage des erreurs de précision (PEP) et des erreurs de temps (PET) selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives . . . . .	152
3. Résultats moyens des temps de latence selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. .	153
4. Résultats moyens des temps de mouvement selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . . . .	154
5. Résultats moyens des vitesses angulaires selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . . . .	155
6. Résultats moyens des durées de l'accélération selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . . . .	156
7. Pourcentages normalisés du temps de mouvement occupé par les moments d'accélération maximale, de décélération maximale, d'entrée en action de l'antagoniste et des durées d'accélération et de décélération selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives pour l'ensemble des sujets. . . . .	157
8. Résultats moyens des durées de la décélération selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . . . .	158

9.	Résultats moyens des moments de décélération maximale selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives . . . . .	159
10.	Résultats moyens des moments d'entrée en action de l'antagoniste selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . . . .	160
11.	Résultats moyens des racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste selon les cinq périodes du mouvement et les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . .	161
12.	Résultats moyens des racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG antagoniste selon les cinq périodes du mouvement et les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . .	162
13.	Résultats moyens des racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) des ratios agoniste/antagoniste selon les cinq périodes du mouvement et les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives. . . . .	163
14.	Résultats moyens des durées de la bouffée initiale de l'agoniste selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives . . . . .	164
15.	Résultats moyens des durées de l'activité agoniste en phase pré-déplacement selon les 12 combinaisons de cible planifiées-effectives . . .	165

# LISTE DES FIGURES

Figures	Page
1. Patron triphasique d'activité électromyographique (EMG) . . . . .	18
2. Schéma représentant le montage expérimental: (2a) représentation du montage vu de côté; (2b) représentation du montage vu du dessus . . .	37
3. Schéma représentant la disposition des cibles . .	42
4. Tracés de déplacement, de vitesse et d'accélération du mouvement . . . . .	48
5. Tracés intégrés de l'activité EMG des muscles agoniste et antagoniste . . . . .	49
6. Pourcentage des essais présentant une erreur de précision en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . . . .	55
7. Pourcentage des essais présentant une erreur de temps en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . . . .	57
8. Tracés hypothétiques des résultats selon l'effet de la cible planifiée et/ou effective. . . . .	59
9. Temps de latence en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . . . .	62
10. Temps de mouvement en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . . . .	64
11. Vitesse angulaire en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . . . .	67



12.	Durée de l'accélération du mouvement en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . .	70
13.	Durée de la décélération du mouvement en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . .	73
14.	Moment de la décélération maximale en fonction de chacune des trois cibles planifiées. . . . .	77
15.	Moment d'entrée en action de l'antagoniste en fonction de chacune des trois cibles planifiées .	81
16.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste en absence de modification de cible, en fonction de chacune des trois cibles selon les cinq périodes du mouvement . . . . .	85
17.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste en fonction de l'atteinte de la cible 1 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	87
18.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste en fonction de l'atteinte de la cible 2 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	89
19.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste en fonction de l'atteinte de la cible 3 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	92
20.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG antagoniste en absence de modification, de cible, en fonction de chacune des trois cibles selon les cinq périodes du mouvement . . . . .	94

21.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 1 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	96
22.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 2 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	98
23.	Racines de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 3 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	100
24.	Ratios de l'activité EMG agoniste/antagoniste en absence de modification, en fonction de chacune des trois cibles selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	104
25.	Ratios de l'activité EMG agoniste/antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 1 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	107
26.	Ratios de l'activité EMG agoniste/antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 2 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	110
27.	Ratios de l'activité EMG agoniste/antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 3 selon les cinq périodes du mouvement. . . . .	112
28.	Durée de la bouffée initiale de l'agoniste en fonction de chacune des trois cibles planifiées. . . . .	115
29.	Durée de l'activité agoniste en phase pré-déplacement en fonction de chacune des trois cibles planifiées . . . . .	119

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

Le contrôle de l'acte moteur fait l'objet d'études et soulève de multiples interrogations particulièrement depuis la fin du siècle dernier. Malgré qu'à ce moment les techniques d'investigation demeuraient rudimentaires, les recherches de cette époque ont conduit à des problématiques nombreuses sur la question du contrôle moteur et à des moyens ingénieux pour les résoudre.

Par exemple, très tôt, on a détecté l'existence d'une activité électrique dans les muscles. Wallace (1981) rapporte les travaux que Wedenski a effectué sur ce phénomène dès 1880. Sherrington (1906) découvre le principe d'innervation réciproque dans un groupe musculaire. Il détermine que les impulsions de neurones afférents, lesquels stimulent à la moëlle les neurones moteurs d'un muscle agoniste, inhibent par le biais d'un neurone intermédiaire les neurones moteurs du muscle antagoniste. On admet dès lors que la régulation d'un mouvement se fait par le biais d'une activité musculaire organisée des muscles agonistes et antagonistes telle que décrite par les signaux électrophysiologiques des muscles concernés.

Wacholder (1928) utilise déjà des techniques d'enregistrement électromyographique (EMG). Selon Wallace (1981), on croit pouvoir lui attribuer la première

démonstration d'activité EMG organisée en fonction d'un couple de muscles agoniste-antagoniste. Il découvre que l'exécution rapide d'un mouvement provoque une activité dite 'phasique' caractérisée par deux bouffées d'activité agoniste (Ag1 et Ag2) séparées par une bouffée d'activité antagoniste (Ant). Au contraire, une exécution plutôt lente fait apparaître une seule bouffée agoniste (Wallace, 1981).

On s'entend dès lors pour dire que l'activité EMG peut refléter les différences d'exécution d'un mouvement. Toutefois, une question d'importance fondamentale demeure en suspens: quels sont les paramètres utilisés lors du contrôle de l'exécution d'une réponse motrice?

Bien que le principe de l'innervation réciproque (Sherrington, 1906) réponde en partie à cette question, il semble évident que le comportement moteur de l'humain ne peut être considéré comme un rassemblement de réponses réflexes (Rigal, 1985). Bien qu'utilisant une voie finale commune, les mécanismes nerveux sur lesquels repose la production d'un mouvement peuvent être activés de différentes façons.

Deux conceptions naissent et chacune à sa façon trouve crédit dans son application particulière. En premier lieu, la vision périphéraliste dans laquelle on retrouve l'hypothèse du contrôle du mouvement en 'boucle fermée' (Adams, 1971). Dans ce cas, le feedback engendré par le mouvement serait comparé à une référence interne, soit la trace perceptuelle. En comparant le feedback produit de la

réponse au critère de référence, l'écart détecté devient la correction à entreprendre. Un tel système constitue un servomécanisme de réduction d'écart. Il est basé sur des réafférences proprioceptives, auditives, visuelles qui contrôlent à chaque instant le déroulement prévu du geste moteur. A partir des réafférences obtenues il est possible de corriger ou modifier le mouvement en fonction du but désiré (Rigal, 1985). C'est la connaissance du but anticipé ou trace mnémonique (Adams, 1971) qui permettrait d'amorcer le mouvement, des réafférences se chargeant d'en guider l'exécution.

Les arguments contre cette position soulignent qu'elle ne peut expliquer les mouvements dont la vitesse d'exécution est telle qu'elle ne procure pas le temps nécessaire à la prise et au traitement de feedback et à la correction du mouvement (Schmidt, 1975). De plus, les périphéralistes sont impuissants à expliquer l'exécution d'un acte moteur en absence d'assistance périphérique (Wallace, 1981).

A l'opposé de la vision périphéraliste, se trouve la position centraliste selon laquelle le mouvement est contrôlé par le biais d'une programmation antérieure à l'action sans utilisation du feedback périphérique en cours d'exécution. Woodworth (1899) soulevait déjà les différences entre les mouvements assistés (lents) et non-assistés (rapides) périphériquement en concluant que la précision d'un mouvement rapide dépend d'un 'ajustement initial' alors que le mouvement lent est ajusté au fur et à mesure que se

déroule l'exécution.

L'idée d'une programmation centrale proposée par Woodworth (1899) fut mise de l'avant par Lashley (1917) lorsqu'il remarqua, chez un patient souffrant d'une lésion à la moëlle épinière annulant toutes informations sensorielles proprioceptives des membres inférieurs mais non des voies efférentes, que la possibilité d'exécuter des mouvements précis était préservée. Les expériences de Wilson (1964) sur les patrons de mouvement du vol de la sauterelle et de Taub et Berman (1968) chez le singe furent autant de démonstrations en faveur de la programmation du mouvement. On connaît aujourd'hui l'existence de structures nerveuses produisant des patrons de mouvement pour l'activité de la marche (Grillner, 1975).

La définition du programme moteur la plus largement acceptée est celle de Keele (1968) qui propose que le mouvement exécuté peut être le résultat de 'commandes neuronales emmagasinées centralement et qui sont structurées centralement avant le début du mouvement', ce qui permet l'entière exécution sans que le feedback périphérique soit nécessaire. Il faut toutefois préciser que Keele (1981) n'adopte plus une position aussi catégorique quant à l'absence de l'influence du feedback périphérique. Il considère maintenant la possibilité que le programme moteur comprenne des boucles de feedback servant à son bon déroulement. Ce mode de contrôle du mouvement par programme moteur est communément appelé mode en 'boucle ouverte' par

opposition au mode de contrôle en 'boucle fermée'.

Cependant, chacun de ces modes de contrôle du mouvement comporte des lacunes dont la principale est sans doute la quantité de représentations des commandes neuronales emmagasinées centralement et nécessaires à l'exécution du mouvement (boucle ouverte) ou l'information gigantesque que constitueraient les représentations des conséquences sensorielles nécessaires pour contrôler le mouvement (boucle fermée). Par exemple, pour la langue anglaise seule, MacNeilage (1970) estime que la capacité de la parler serait liée à la représentation en mémoire de plus de 100,000 phonèmes. Il n'apparaît donc pas économique, en termes de facilité de récupération ou d'espace disponible, d'emmagasiner tous les patrons d'innervation ou les conséquences sensorielles de chacun des mouvements de l'humain (Schmidt, 1975).

En réponse à ce problème, des alternatives sont posées: la théorie du schéma (Schmidt, 1975), la théorie de l'impulsion (Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank et Quinn, 1979; Wallace, 1981) et le modèle masse-ressort (Bizzi, Dev, Morasso et Polit, 1978; Polit et Bizzi, 1978, 1979).

Parmi ces alternatives, une d'elles retient l'attention. Il s'agit du modèle masse-ressort puisque ce dernier inclut le paradigme de la localisation de la cible, soit la planification de la position terminale du mouvement. Le modèle masse-ressort prolonge l'idée de MacNeilage (1970) à l'effet que c'est à partir de la connaissance de la

position terminale désirée que se règlent les paramètres de l'exécution du mouvement. Sans rejeter le modèle de la boucle fermée, nous nous demandons, pour les mouvements exécutés en boucle ouverte, si la connaissance de la position terminale ne constitue pas la seule information nécessaire en rendant superflus le stockage d'éventuels patrons d'innervation ou des conséquences sensorielles anticipées.

### Hypothèse de la cible

Abend, Bizzi et Morasso (1982) dans une étude touchant la formation des trajectoires du bras dans une tâche d'atteinte, avancent l'idée que le point terminal de la trajectoire est spécifié en termes de représentations spatiales traduites en coordonnées cartésiennes. Une telle représentation faciliterait le contrôle et la régulation du système moteur (Arbib, 1981; Soechting et Lacquaniti, 1983). Cet énoncé ravive l'hypothèse de la cible de MacNeilage, (1970). Cette hypothèse proposée par MacNeilage (1970) semble constituer une réponse viable aux questions posées ci-haut puisque les études sur ce phénomène suggèrent que l'atteinte d'une position terminale avec efficacité est possible indépendamment des perturbations appliquées en cours de route ou de la connaissance de la position de départ (Bizzi et al, 1979; Kelso, 1977).

MacNeilage (1970) propose donc qu'il est possible que



les informations de localisation spatiale de la cible soient les seules stockées centralement et qu'elles servent à élaborer les commandes motrices de l'exécution du mouvement vers la position terminale prévue. Cette prémisse jette les bases de l'hypothèse de la cible. Par ses travaux sur la production du langage parlé, MacNeilage (1970) met en relief que le mouvement phonatoire est préparé en fonction de la position terminale prévue, notamment celle de la langue et des lèvres. Utilisant des relevés électromyographiques des muscles impliqués dans la production de voyelles, il a déterminé qu'en dépit des phonèmes précédant ou suivant la production des voyelles, la position terminale de la langue et des lèvres demeuraient invariantes.

MacNeilage (1980) souligne que même en absence de feedback visuel, l'atteinte du but visé semble demander une habileté à se représenter la cible en termes de coordonnées spatiales intériorisées sur lesquelles se basent les commandes motrices de l'exécution. Faisant suite à cette idée, il fut récemment démontré que la connaissance préalable de la position de la cible raccourcit le temps de planification (temps de réaction) ainsi que le temps de mouvement. Dans une série d'études sur l'utilisation de l'information de la cible, Girouard, Proteau et Laurencelle (1986) ont déterminé que si le sujet connaît la localisation de la cible avant le signal (aléatoire) de départ, le temps de réaction au choix est réduit aussi bien que le temps de mouvement.

Dans les expériences sur le contrôle visuel d'un mouvement d'atteinte rapide sans la vision du membre, il fut démontré que les sujets peuvent modifier leur mouvement vers une cible visuelle de façon efficace même s'ils ne voient pas le membre exécutant pendant la trajectoire (Prablanc, Pélisson et Goodale, 1986). De plus, en absence de feedback visuel de la position du membre effecteur, la relation durée de mouvement et précision est préservée conformément à la loi de Fitts (1954), de même que la durée du mouvement, la valeur de la vitesse maximale et la forme de la trajectoire (Jeannerod, 1981). Ces résultats indiquent que le feedback visuel du membre n'est pas l'unique source d'information servant au contrôle du mouvement et que l'information dérivée des propriocepteurs et/ou d'une copie de l'efférence du mouvement joue aussi un rôle (Prablanc et al, 1986). Ces informations servent d'appui à l'idée d'une représentation interne de la position spatiale de la cible. La précision de cette représentation est d'autant plus grande si elle se forme à partir de l'image fovéale (Prablanc, Echallier, Komilis et Jeannerod, 1979; Goodale, Pélisson et Prablanc, note 1). Le principe de ce système serait le suivant: les informations visuelles rétiniennes et celles de la position de l'oeil renseignent sur la position de la cible et c'est à partir de cette information que des commandes motrices sont élaborées (Prablanc, Pélisson, Goodale et Jeannerod, 1986). Dans le même ordre d'idées, l'information initiale (position de la cible) constituerait une image du but à atteindre et

celle-ci resterait présente jusqu'à l'exécution complète. Cette conception suppose que les coordonnées du but à atteindre seront matérialisées dans les zones cérébrales de commandes du mouvement sous la forme d'un programme d'exécution (Jeannerod, 1981; Goodale et al, note 1).

On observe dans le mouvement d'atteinte rapide, une importante phase de décélération qui persiste même en absence de feedback visuel du membre. Ainsi, la décélération ne peut être due à la vision seule (Jeannerod, 1981). On peut la voir comme étant programmée à travers l'activité des muscles antagonistes (Jeannerod, 1981; Arbib, 1985).

Dans les études du mouvement lors de modification de la position de la cible (Soechting et Lacquaniti, 1981; 1983; Lestienne et al, 1981; Morasso, 1981) on a déterminé que les processus moteurs contrôlant la position finale et la trajectoire du membre semblaient être tout à fait indépendants l'un de l'autre puisque l'activité EMG finale relevée dans les muscles agonistes et antagonistes était affectée par une modification de la position finale et non par la vélocité, la direction ou l'amplitude du mouvement.

D'autre part, on observe que lorsque la cible est susceptible de changer de position, l'activité de l'antagoniste se manifeste de 30 à 100% plus tôt dans le mouvement. En cas de modifications de cible, il s'écoule au moins 100 ms avant que n'apparaissent des modifications de l'activité EMG correspondant à des corrections du mouvement (Soechting et al, 1983). Ces résultats corroborent ceux

trouvés par Wadman, Denier van der Gon, Geuze et Mol (1979).

A partir de ces informations, il semble possible que la programmation motrice s'établisse sur la base de l'information de la position de la cible, cette information modulant l'activité EMG et la réglant en fonction du but à atteindre. Cet énoncé constitue le principe de base du modèle masse-ressort qui soutient que l'atteinte de la cible (position terminale) repose sur l'équilibre des forces agoniste-antagoniste produites par le réglage longueur-tension programmé à partir de la connaissance de la position de la cible (en termes de coordonnées spatiales).

#### Modèle masse-ressort

Le modèle masse-ressort suggère la planification d'un point d'équilibre entre les activités des muscles agonistes et antagonistes (Crossman et Goodeve, 1963; Asatryan et Feldman, 1965; Feldman, 1966a, 1966b). Ce point d'équilibre ainsi planifié représente la position terminale prévue du mouvement entrepris (Bizzi, Dev, Morasso et Polit, 1978; Polit et Bizzi, 1979; Lestienne, Polit et Bizzi, 1981).

Dans une série de travaux, Asatryan et Feldman (1965) suggèrent que le mouvement résulte des propriétés mécaniques de type 'ressort' des muscles. La relation entre la longueur du muscle et la tension qui y est développée est définie par le niveau d'innervation musculaire de chacun des muscles d'un couple agoniste-antagoniste. Cette relation

longueur/tension des muscles s'opposant détermine la position du membre en un point d'équilibre. Changer le niveau d'innervation dans un des muscles ou les deux, change l'état d'équilibre et donne une nouvelle position du membre. L'équilibre obtenu entre les rapports longueur/tension détermine la position des segments articulaires et dépend de la sélection appropriée de ces rapports entre les muscles opposés. Bizzi et al (1978) et Polit et al (1979) ont montré la capacité chez le singe déafférenté d'exécuter des mouvements précis de flexion-extension du bras en dépit du fait que le membre agissant soit hors de vue et que des perturbations par déplacement du bras vers ou à l'opposé de la cible soient appliquées. La performance des singes déafférentés est aussi bonne que celle des singes non déafférentés. Ces résultats sont compatibles avec l'hypothèse de la programmation du mouvement puisque les singes déafférentés n'ont aucune information provenant des événements mécaniques causés par les perturbations et que l'atteinte de la position terminale ou point d'équilibre n'est pas affectée. Le programme moteur contiendrait donc les spécifications requises pour atteindre la position finale malgré les imprévus de la trajectoire. Ces observations sont en accord avec celles de Feldman (1974). Feldman (1974) indique que la déafférentation des muscles n'empêche pas le choix volontaire d'une posture. Ainsi le choix volontaire d'une posture est possible sans l'intervention de feedback de la périphérie.

Considérant le réglage de l'activité des motoneurones alpha comme le principe de base du point d'équilibre, Lestienne, Polit et Bizzi, (1981) trouvent, dans une tâche de positionnement angulaire, que les rapports d'activité électromyographique (EMG) entre les muscles agoniste et antagoniste sont constants pour une position donnée seulement. Les rapports observés se règlent en fonction d'une position finale particulière indépendamment de la direction et de la vitesse du mouvement. Cependant, l'étude de Matheson, Hallet, Berardelli, Weinhaus et Inzucchi (1985) contredit ces résultats. Matheson et al (1985) n'ont pas observé de corrélation entre les ratios EMG des agonistes/antagonistes, l'activité agoniste ou antagoniste et la position terminale dans des mouvements de flexion-extension lents ou rapides. Pour la même position finale, les ratios d'activité EMG variaient selon la vitesse du mouvement et le point d'où il était amorcé. D'autre part, ils soulignent que l'activité EMG n'est pas le seul élément responsable de la relation longueur/tension. Celle-ci peut être affectée par le niveau de pratique et le degré de fatigue du muscle. Ces résultats suggèrent que l'hypothèse de la position terminale est incorrecte. De plus, ces auteurs rapportent que l'activité des neurones des centres nerveux moteurs est elle-même corrélée avec la direction et la vitesse du mouvement et non avec sa position finale.

Berkinblit, Feldman et Fickson (1986) proposent que le contrôle volontaire du mouvement se fait sur la base d'une

régulation centrale du seuil du réflexe d'étirement. Par cette régulation, la force et la longueur du muscle seraient ainsi contrôlées. L'idée de base remonte aux travaux de Asatryan et Feldman (1965) et Feldman (1966a, 1966b) alors qu'ils considéraient que le contrôle central du point d'équilibre se basait sur des modulations du seuil du réflexe d'étirement. De l'avis de Berkinblit et al (1986), le modèle masse-ressort est plus qu'un simple système mécanique agissant aveuglément en réponse à une commande centrale initiale. On se rappellera que le modèle de Bizzi et al (1978) soutient qu'une commande centrale règle le niveau d'activation de chaque muscle du couple agoniste et antagoniste. Au point d'intersection des pentes longueur/tension se trouve le point d'équilibre entre les deux muscles. Ce point d'équilibre traduit la position finale du membre dans l'espace. Qu'une commande spécifie un nouveau niveau d'activation des motoneurones alpha, un nouveau point d'équilibre est envisagé et entraîne le mouvement vers une nouvelle position terminale. Selon Berkinblit et al (1986) cette régulation s'effectuerait sur la base de l'ajustement du réflexe d'étirement.

### Réflexe d'étirement

Le réflexe d'étirement est la manifestation complexe de l'ajustement des fibres extrafusales aux fibres intrafusales. Le produit essentiel de ce réflexe est représenté par la contraction réflexe du muscle soumis à un étirement.

Le circuit neuronal du réflexe d'étirement est le suivant: à partir du fuseau neuromusculaire, la fibre afférente IA pénètre la corne dorsale de la moëlle. Cette fibre envoie une branche directement à la corne antérieure et fait contact synaptique avec un neurone moteur qui prolonge ses fibres jusqu'au muscle d'où origine le fuseau neuromusculaire. Comme cette voie est monosynaptique, le signal produit par l'excitation du fuseau peut être retourné pratiquement sans délai au muscle. Quelques-unes des fibres II suivent la même voie, mais la plupart se terminent à des interneurons de la moëlle et causent ainsi un délai dans la transmission du signal.

En réponse à l'étirement du muscle, un signal produit par le fuseau neuromusculaire se rend à la moëlle et cause en retour la contraction des fibres alpha, la contraction musculaire s'opposant à l'étirement.

La position de Berkinblit et al (1986) est que le contrôle de la position spatiale du membre en tant que point d'équilibre entre les rapports tension/longueur des muscles agonistes et antagonistes s'appuie sur la modulation du



réflexe d'étirement. Le réflexe d'étirement, ayant un seuil et un gain variables, alloue une tension variant selon la longueur initiale du muscle (Berkinblit et al, 1986, Feldman et Olrovsky, 1972; Feldman, 1966a, 1966b). C'est pourquoi on suggère que le modèle masse-ressort repose sur les mécanismes d'ajustement du réflexe d'étirement réglant le rapport longueur/tension dans le couple agoniste-antagoniste. C'est en établissant l'égalité des rapports longueur/tension des muscles agonistes et antagonistes par l'activité réflexe que le point d'équilibre serait spécifié en tant que position à atteindre dans l'espace. Sous le principe de l'innervation réciproque, l'activation de l'agoniste se raccourcissant produit une augmentation de la tension dans ce muscle alors que l'inhibition de l'antagoniste s'étirant cause dans celui-ci, une diminution de tension pendant le mouvement. Le point d'équilibre est atteint lorsque, par réflexe d'étirement, l'antagoniste, suffisamment étiré, contracte pour contrecarrer l'action de l'agoniste. Il en résulte donc une égalité entre les ratios longueur/tension de ces deux muscles. Cette égalité définit une position d'équilibre du membre, soit une position terminale nouvelle. Le concept du point d'équilibre est important parce qu'il permet de tenir compte à la fois des propriétés élastiques et mécaniques des muscles et de leur contrôle par le système nerveux central. Tel que vu par Feldman (1966a, 1966b) d'abord et plus tard par Berkinblit et al, (1986), le système nerveux central

spécifierait la position angulaire globale du membre définissant ainsi l'activité de l'ensemble des paires agonistes-antagonistes intervenant dans le mouvement. L'activité EMG de chaque muscle déterminant la position angulaire de membre pourrait donc être modulée par l'organisation du réflexe d'étirement en termes de seuil et de gain.

#### Patrons d'activité électromyographique

Tel qu'indiqué par Lestienne et al (1981), le recueil EMG reflète l'activité des motoneurones alpha. Le signal EMG permet donc d'apprécier l'activité électrique du muscle conséquente au travail qu'il produit. En contrôlant des variables telles que l'amplitude, la vélocité et la durée du mouvement ou la masse inertielle, il est possible de dégager des aspects renseignant sur les facteurs neuromoteurs reliés à l'exécution du mouvement.

Les enregistrements électromyographiques de mouvements lents de durées supérieures à une seconde montrent que seul le muscle agoniste intervient durant toute la durée du mouvement (Ghez et Martin, 1982; Lestienne, 1979). Dans le cas de mouvements plus rapides les rôles respectifs d'accélérateur et de décélérateur des muscles agonistes et antagonistes sont au contraire mis en évidence ( Forget et

Lamarre, 1986; Lestienne, 1979; Wadman et al, 1979; Normand, Lagassé, Rouillard et Tremblay, 1982; Wallace, 1981; Angel, 1975, 1977 ; Hallet, Shahani et Young, 1975).

Lorsque le mouvement est exécuté rapidement, l'activité agoniste-antagoniste consiste en des bouffées EMG bien définies. Cette organisation est appelée 'patron triphasique' (figure 1) en ce sens qu'elle se compose de trois bouffées d'activité EMG distinctes. La première bouffée concerne l'agoniste (Ag1) et produit la force nécessaire à l'accélération du membre. La seconde concerne l'antagoniste (Ant), prend place durant la phase dynamique du mouvement et est associée au silence relatif de l'agoniste. Elle correspond à l'activité de décélération du membre. La troisième bouffée est observée dans l'agoniste après la période silencieuse. Son rôle est moins bien connu. Jusqu'à maintenant, les chercheurs y voient une activité de correction du mouvement vers la cible ou de fixation du mouvement (Angel, 1975,1977). D'autres voient dans Ag2 une activité due au réflexe d'étirement dans le muscle puisque que son amplitude est fonction de la force de décélération de l'antagoniste (Ghez et Martin, 1982). Cependant, Forget et Lamarre (1986) soulignent que Ag2 est observée chez le sujet déafférenté et qu'elle n'est donc pas due à une réponse à des événements périphériques.

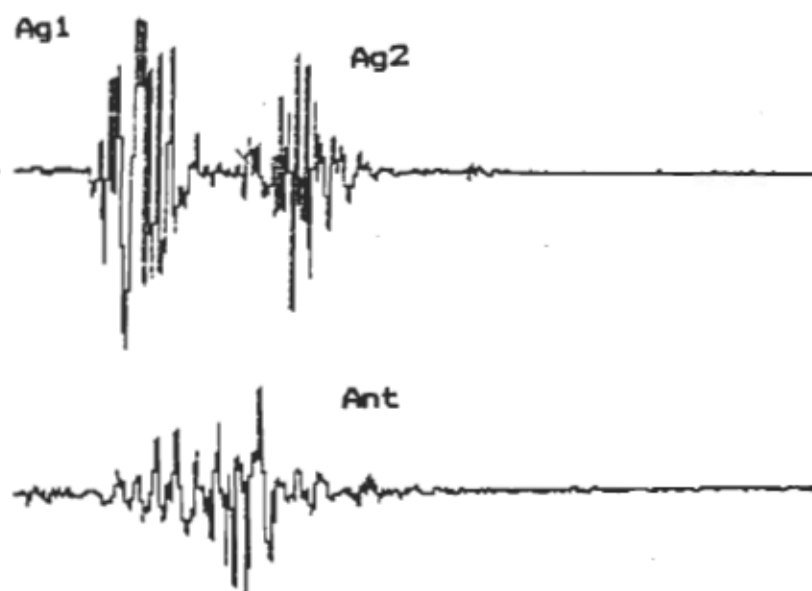


Figure 1. Patron triphasique d'activité électromyographique agoniste-antagoniste. Le tracé supérieur représente l'activité du muscle agoniste caractérisée par deux bouffées distinctes (Ag1 et Ag2) séparées par une période de silence relatif. Le tracé inférieur représente l'activité du muscle antagoniste (Ant) coïncidant avec la période silencieuse de l'agoniste.

### Couple agoniste-antagoniste

Les recherches sur l'organisation du patron d'activité EMG triphasique et sur le contrôle du mouvement volontaire ont connu un essor important vers la fin des années 1970. Malgré la quantité de recherches mettant en relief des variables telles que l'amplitude, la vitesse, la masse inertielle ou les perturbations du mouvement, les résultats demeurent quelque peu contradictoires. Les grandes questions restent: dans l'organisation du mouvement, qu'est-ce qui est dû à une programmation centrale? et qu'est-ce qui relève du contrôle périphérique?

En d'autres mots, on se demande ce qui influence l'organisation de l'activité EMG qui décrit l'exécution du mouvement dans le temps et l'espace? Si la réponse semble ne pas apparaître facilement, c'est sans doute parce que le phénomène est complexe et variable selon les conditions mises en place pour l'étudier. Néanmoins, il demeure possible de tracer un portrait du phénomène d'organisation du patron triphasique.

Il faut d'abord identifier les facteurs de variation du phénomène. On reconnaît un rôle à l'amplitude des bouffées EMG agonistes et antagonistes et à leurs durées. Ces facteurs sont liés et covariant ou non avec les paramètres du mouvement: soit la distance à franchir, la vitesse et le temps de mouvement.

Un fait qui semble assez robuste concerne la durée de

l'agoniste. Pour une vitesse donnée la durée de la bouffée agoniste augmente en fonction de la distance parcourue par le mouvement (Wierzbicka, Wiegner et Shahani 1986; Brown et Cooke, 1986; Gielen, Van der Oosten et Pull ter Gunne, 1985; Cooke, Brown, Forget et Lamarre, 1985; Wadman et al., 1979).

L'amplitude de la bouffée agoniste initiale se trouve reliée à la vitesse du mouvement. Plus l'amplitude de la bouffée augmente, plus la vitesse de mouvement du membre est élevée et à distance égale, le temps de mouvement se trouve réduit. Gielen et al (1985) indiquent que pour des mouvements de distance variable effectués en un temps constant, l'amplitude de l'agoniste augmente avec la distance alors que sa durée est relativement stable. Dans ce cas-ci, on comprendra que pour exécuter un mouvement plus long en un temps constant, il faut en augmenter la vitesse. L'augmentation de l'amplitude de l'agoniste résulte donc en une augmentation de la vitesse de mouvement. Dans la même étude, lorsque les auteurs ont fait exécuter aux sujets des mouvements de distance constante mais en des temps variables, on a remarqué une plus grande amplitude de l'agoniste pour les mouvements les plus rapides soit ceux dont les temps de mouvement étaient les plus courts. On réalise ici encore la relation amplitude de l'agoniste et vitesse du mouvement. Quant à la durée de la bouffée, elle se montre relativement constante puisque la distance l'est.

En résumé, la durée de la bouffée initiale de l'agoniste est influencée par la distance à parcourir alors

que son amplitude l'est par la vitesse du mouvement. Plus la distance allonge, plus la durée de la bouffée allonge à la condition que la vitesse de mouvement soit constante. Plus la vitesse augmente, plus l'amplitude de la bouffée initiale de l'agoniste augmente à condition que la distance à franchir soit constante. Si la distance augmente et que le temps de mouvement demeure constant, c'est l'amplitude de la bouffée agoniste qui traduit l'augmentation de la vitesse. Lorsque la vitesse et la distance covarient, c'est-à-dire lorsque les deux augmentent ou diminuent en même temps ou que l'un augmente alors que l'autre diminue, on remarque encore une fois que la durée de la bouffée est liée à la distance et que son amplitude l'est à la vitesse.

L'agoniste initial est vu comme étant programmé centralement car sa présence est observée malgré que des perturbations soient introduites au début du mouvement. Angel (1975) a effectué une série d'expériences dans lesquelles des mouvements de 20 cm exécutés en 250 ms étaient accélérés passivement ou bloqués avant l'amorce. Il fut démontré que lors de l'accélération passive du membre, la durée de Ag1 n'était pas affectée mais que son amplitude diminuait. Dans les essais où le mouvement se trouvait bloqué, la période de silence disparaissait de sorte que Ag1 et Ag2 ne pouvaient être distingués.

A la lumière de ses résultats, Angel (1975) conclut que l'activité Ag1 est programmée à l'avance quoiqu'elle demeure sensible à des changements périphériques. Brown et Cooke

(1986) arrivent aussi à la conclusion que l'agoniste initial peut se modifier si des perturbations précèdent le mouvement. Des informations récentes (Brown et Cooke, 1981b; Cooke et al, 1985) ont permis d'établir que la bouffée agoniste initiale est constituée d'un certain nombre de composantes d'une durée d'environ 70 ms chacune. Chaque composante est en fait une bouffée d'activité EMG et c'est le nombre de ces bouffées qui forment la bouffée initiale de l'agoniste. Le nombre de ces composantes dépend de la longueur du mouvement en termes de distance (Brown et al, 1986). Dans le mouvement libre, des bouffées agonistes initiales de durées différentes seraient produites par le 'recrutement' d'une ou plusieurs de ces composantes. Le nombre de ces composantes serait programmé centralement (Cooke et al, 1985). Dans le même ordre d'idée, Forget et Lamarre (1986) considèrent la durée de l'agoniste comme étant programmée centralement. Il semble que, dans les cas de perturbations précédant le mouvement, seule la partie tardive de la bouffée initiale est modifiée c'est-à-dire la dernière composante. La première semble franche des influences périphériques (Brown et al, 1986).

Hallet et al (1975) soulignent la présence d'une organisation triphasique des patrons d'activité EMG chez les sujets déafférentés lors de l'exécution de mouvements balistiques. Comme cette organisation est très semblable à celle observée chez le sujet normal, ils en concluent que l'activité triphasique est programmée centralement et ils



suggèrent un contrôle supra-segmentaire adressé aux motoneurones alpha dans un premier temps et dans un second temps aux motoneurones gamma, ces derniers assurant le contrôle du mouvement par coactivation alpha-gamma.

Cependant, des résultats obtenus chez l'animal indiquent qu'après déafférentation la réponse triphasique est totalement absente (Lamarre, Spidalieri, Busby et Lund, 1980). De plus, chez l'humain déafférenté, la présence d'un patron triphasique clairement identifiable semble plutôt rare (Forget et Lamarre, 1986; Sanes, Mauritz, Dalakas et Evarts, 1985). La performance d'un mouvement initié de façon balistique est radicalement modifiée dans le cas d'une déafférentation car les ajustements dus à l'activité réflexe sont abolis (Terzuolo, Soechting et Ranish, 1974).

Il est raisonnable de penser que si la déafférentation abolit l'activité triphasique c'est donc que celle-ci n'est pas programmée centralement, du moins pas entièrement.

Le recueil de l'activité des neurones du cortex moteur indique qu'ils déchargent de 50 à 60 ms avant le début de la contraction de l'agoniste et qu'ils cessent lorsque le mouvement atteint sa vitesse maximale. De plus, la fréquence de décharges est proportionnelle à l'amplitude de l'activité EMG et à la vitesse du déplacement. En absence de feedback périphérique, les neurones moteurs conservent le même patron de décharge et la même organisation temporelle (Lamarre, Bioulac et Jacks, 1978). Ainsi, on peut concevoir l'organisation du mouvement simple (monoarticulaire) comme

produit par une décharge d'impulsions réglées centralement et excitant les motoneurones alpha de l'agoniste. L'amplitude de ces impulsions déterminerait les propriétés dynamiques du mouvement, le tout fonctionnant, au moins pour la période d'accélération positive, sous le mode de 'boucle ouverte' (Lamarre et al, 1980). De plus, au même moment, l'enregistrement des voies sensorielles thalamocorticales montre une inhibition. Le feedback périphérique serait non seulement inutile mais inhibé pendant les premiers temps de l'exécution (Lamarre et al, 1980). Cependant, le feedback pourrait prendre toute son utilité vers la fin du mouvement, contribuant ainsi à l'ajustement précis du mouvement (Forget et Lamarre, 1986; Sanes et al, 1985).

Si la bouffée agoniste est le produit d'une planification centrale, qu'en est-il de la bouffée antagoniste? A la lumière des informations précédentes, il ne semble pas que l'antagoniste soit programmé centralement puisque la déafférentation supprime le patron triphasique.

Wadman et al (1979) ont étudié l'organisation de l'activité agoniste-antagoniste lors de mouvements balistiques dans une tâche d'atteinte. Comme leurs prédécesseurs, ils ont remarqué un agencement triphasique de l'activité EMG. Ils observent que la durée de la bouffée initiale de l'agoniste (accélération du membre) augmente en fonction de la distance à franchir. En ce qui concerne l'antagoniste, ils remarquent que plus la distance à parcourir est grande, plus l'entrée en action de

l'antagoniste est retardée. Ce fait prend d'autant plus d'importance que le moment d'entrée en jeu de l'antagoniste semble être préparé avant que le mouvement ne débute.

Ceci a été démontré lorsque le mouvement était bloqué mécaniquement avant le début de l'exécution et à l'insu du sujet. Les patrons d'activité EMG demeuraient identiques à ceux relevés lors des mouvements non bloqués et ce pour une période d'au moins 100 ms. Comme la préparation d'un mouvement court entraînait l'entrée en jeu de l'antagoniste tôt dans l'exécution, le blocage de ce type de mouvement ne modifiait pas le moment de l'entrée en action de l'antagoniste. Cette activité était donc visible dans les 100 premières ms tout comme cela se serait passé dans le cas d'un mouvement libre.

A l'opposé, un mouvement préparé en fonction d'une grande distance ne laissait pas voir d'activité antagoniste dans la période des 100 ms puisque conformément à la préparation d'un mouvement libre, le moment d'entrée en action de ce muscle était de toute façon prévu plus tard.

Le moment d'entrée en action de l'antagoniste semble donc être réglé à l'avance et se produire en conséquence de cette planification tant que des informations périphériques n'indiquent pas le contraire. Angel (1977) propose que l'antagoniste est programmé puisque l'activité antagoniste est visible très tôt dans le mouvement, souvent avant même que l'agoniste se soit tu. De plus, l'antagoniste se manifeste même lorsque le mouvement est bloqué avant ou

immédiatement après le début du déplacement. Il est donc peu probable que le moment d'entrée en action de l'antagoniste soit dû à des influences périphériques puisque le mouvement n'a pas eu lieu (Hallet et al (1975), rapporté dans Angel, 1977). Cependant Angel (1977) arrive à des conclusions différentes en ce qui concerne les modulations de l'activité antagoniste et propose que le moment d'entrée en action soit programmé alors que sa durée et son amplitude dépendent des influences périphériques.

Une autre hypothèse est celle selon laquelle le moment d'entrée en action de l'antagoniste et ses paramètres de durée et d'amplitude résultent d'activités réflexes introduites par les informations périphériques dérivées du mouvement (Ghez et Martin, 1982). Plus spécifiquement, le feedback proviendrait principalement des propriocepteurs musculaires agissant en interaction avec des commandes centrales. L'idée de Forget et Lamarre (1986) concernant l'amplitude et le moment d'entrée en action de l'antagoniste est qu'ils seraient liés à la vitesse et l'accélération initiales du mouvement. Ils remarquent chez le sujet non déafférenté que pour une distance constante, le moment d'entrée en action de l'antagoniste est devancé si la vitesse augmente alors qu'il est retardé si la vitesse diminue. Par contre, à vitesse constante, l'antagoniste se manifeste plus tard si la distance augmente et plus tôt si la distance diminue. L'amplitude de l'antagoniste se montre indépendante de la distance à franchir mais est corrélée à

l'accélération et la vitesse du mouvement. Chez le sujet déafférenté, cette corrélation n'est pas retrouvée et le moment d'entrée en action se montre très variable.

Le moment d'entrée en action et l'amplitude de l'antagoniste sont réputés être en étroite relation avec la vitesse et l'accélération angulaires du membre (Lestienne, 1979; Forget et Lamarre, 1986). Plus l'accélération initiale du membre est grande, plus l'antagoniste a d'amplitude. En contre-partie, la latence de l'antagoniste varie inversement avec l'accélération de façon à ce qu'une forte accélération entraîne l'antagoniste plus tôt dans le mouvement (Ghez et Martin, 1982). Les expériences dans lesquelles la masse inertielle fut augmentée ont contribué à illustrer ce phénomène. Plus la charge augmente, moins la vitesse de mouvement est grande et, de cette façon, moins l'antagoniste a de l'amplitude et plus il est retardé. Cependant, à vitesse constante, l'augmentation de la charge fait augmenter l'antagoniste mais sans en changer le moment d'entrée en action (Lestienne, 1979). Forget et Lamarre (1986) sont d'avis que le système nerveux central émet une séquence de commandes pour accélérer et décélérer le membre mais que l'ajustement de l'amplitude et du moment de la décélération est dû à des informations périphériques. Des commandes motrices centrales sont suffisantes pour initier le mouvement mais les afférences proprioceptives sont importantes pour le maintien de la posture et le contrôle fin du mouvement (Sanes et al, 1985).

La séquence d'activation (relation temporelle entre la bouffée agoniste initiale et le moment d'entrée en action de la bouffée antagoniste) telle que définie par Normand et al. (1982) est clairement en corrélation avec la vitesse du mouvement. L'organisation des patrons électromyographiques des muscles agonistes et antagonistes semble être déterminée entre autres par la vitesse sélectionnée par le sujet (Lestienne, 1979). Dans l'étude de Lestienne (1979), des mouvements de flexion-extension furent exécutés à amplitude constante en tenant compte de trois niveaux de vitesse et de quatre niveaux de masse ajoutée. Il fut démontré que: (a) la séquence d'activation agoniste/antagoniste est indépendante de la masse inertielle, (b) en deçà d'une certaine vitesse les bouffées EMG de l'agoniste et de l'antagoniste sont caractérisées par un chevauchement partiel, (c) le moment d'entrée en action de l'antagoniste est lié à la vitesse du mouvement; pour la même distance, il entre en jeu plus tôt lorsque le mouvement est plus rapide, (d) la durée de l'activité agoniste est approximativement constante (entre 80 et 100 ms) pour les mouvements rapides, quelle que soit la charge, et finalement, (e) pour une même distance, le ratio durée de l'agoniste/durée du déplacement demeure relativement constant (20 à 30%) alors que ce ratio pour l'antagoniste diminue de 50 à 10% quand la vitesse augmente.

La conclusion de Lestienne (1979) est que la bouffée agoniste représente une unité programmée alors que le moment d'entrée en action de l'antagoniste est aussi programmé mais

qu'il varie en fonction de la vélocité.

Ainsi pour la même distance à franchir, le moment d'entrée en action de l'antagoniste est plus tôt et son amplitude plus grande en fonction de la vitesse du mouvement (Gielen et al, 1985; Marsden, Obeso et Rothwell, 1983; Forget et Lamarre, 1986). Pour des distances de mouvement variables effectuées à vitesse constante, le moment d'entrée en action de l'antagoniste est plus tôt pour les mouvements courts et plus tard pour les longs. Pour des mouvements de distances variables alors que la vitesse augmente linéairement, le moment d'entrée en action de l'antagoniste est invariant et l'ajustement se fait au niveau de l'amplitude et de la durée de la bouffée antagoniste.

L'idée que l'antagoniste contrôle le temps de mouvement n'est pas nouvelle (Normand et al, 1982). On a démontré que pour des mouvements exécutés à vitesse maximale, il existe une séquence d'activation optimum contribuant à une réduction de 35% du temps de mouvement comparativement au temps enregistré lors d'essais témoins. Dans cette étude, la distance à franchir étant constante, la réduction du temps de mouvement était donc attribuable au moment d'entrée en action de l'antagoniste. Si ce dernier se manifeste trop tôt, il freine prématurément le travail de l'agoniste, réduit la vitesse et augmente le temps de mouvement. En entrant en jeu plus tardivement, il laisse un temps d'accélération plus grand, donc un gain en vitesse et une réduction du temps de mouvement. Si toutefois il entre en

jeu trop tard, le sujet dépasse la cible prévue. Dans le même ordre d'idées, lors d'une expérience de reproduction du mouvement, le temps de mouvement fut réduit de 400 ms à moins de 200 ms lorsque le muscle antagoniste fut activé par stimulation électrique (Wierzbicka et al, 1986). Les chercheurs remarquent de plus une relation directe entre l'importance de l'agoniste et l'importance de l'antagoniste. Cette relation signifie qu'une grande force d'accélération doit être contrecarrée par une grande force de décélération. On suppose que dans le mouvement rapide, le système nerveux central règle une bouffée antagoniste plus grande que nécessaire; cela contribuant à un temps de mouvement minimum (Wierzbicka et al, 1986; Marsden et al, 1983). Il est bien connu qu'un muscle travaillant en condition excentrique, comme c'est le cas pour l'antagoniste, engendre plus de force.

Il semble cependant que l'atteinte d'une cible avec précision dépend davantage de l'arrangement temporel agoniste/antagoniste que de l'amplitude seule de l'antagoniste (Normand et al, 1982; Wierzbicka et al, 1986; Marsden et al, 1983; Forget et Lamarre, 1986). On sait que la phase de décélération persiste dans les mouvements exécutés en absence de guidage visuel. Si cette phase ne repose pas sur des indices visuels, on peut penser qu'elle est programmée au même titre que les autres composantes du mouvement. Ce n'est pas la présence des indices visuels qui engendre la phase de décélération. Mais comme on sait que



les indices visuels sont préférés aux indices proprioceptifs en ce qui concerne la précision finale, on présume que la phase de décélération est mieux structurée sur la base des indices visuels. La précision du mouvement serait donc aidée par les indices disponibles en cours de mouvement et spécialement dans la phase de décélération, soit les indices proprioceptifs (en absence de guidage visuel) d'une part mais plus particulièrement les indices visuels (en contrôle visuel) (Jeannerod, 1981). Une commande globale, programmée, concernant la phase de décélération pourrait être donnée et l'ajustement fin du mouvement rendu possible et plus efficace par les indices visuels disponibles.

A partir de ces études, il fut conclu que la séquence d'activation du patron triphasique s'adapte suite à l'apprentissage du mouvement puisque la réduction des temps de mouvement n'est pas reflétée par une modification des temps de contraction des muscles agonistes et antagonistes mais plutôt par l'entrée en action retardée de l'activité antagoniste laquelle permet à l'agoniste de jouer davantage son rôle d'accélérateur. Un tel effet d'apprentissage fut aussi remarqué chez l'animal dans l'entraînement à un mouvement d'atteinte d'une cible spatiale (Georgopoulos, Kalaska et Massey, 1981). Une autre conclusion est qu'une organisation temporelle mieux structurée des patrons d'activité EMG permet d'améliorer les temps de mouvement sans détérioration de la précision.

## Problème

Les récentes recherches sur la programmation et le contrôle du mouvement ont mis en évidence une organisation triphasique des patrons d'activité EMG dans le couple agoniste-antagoniste telle que reflétée par l'exécution d'un mouvement monoarticulaire rapide. Par ailleurs, les données obtenues à partir des expériences sur l'animal (Bizzi et al, 1978; Lamarre et al, 1982) et chez l'humain (Hallet et al, 1975; Cooke et al, 1985; Forget et Lamarre, 1986) indiquent la possibilité d'exécuter avec une précision relative un mouvement rapide et d'observer un patron triphasique caractéristique d'un tel mouvement. On suppose d'une part, que l'organisation triphasique du couple agoniste-antagoniste est due, du moins partiellement, à la programmation centrale du mouvement. D'autre part, on présume que c'est la connaissance de la position de la cible, dans laquelle se confondent la direction, l'amplitude et même la précision du mouvement, qui sert de base à l'élaboration du programme moteur (Jeannerod, 1981; Bizzi et al, 1978; Abend et al, 1982; Soechting et al, 1983; Goodale et al, sous-presse).

Le but de cette étude est de déterminer si la connaissance préalable de la position terminale ou position de la cible dans l'espace est l'information sur laquelle se construit le programme moteur tel que le reflète l'organisation de la séquence d'activation des muscles

agonistes et antagonistes dans un mouvement d'atteinte rapide. Si l'information de la cible est un paramètre peu ou pas utile, la durée de la bouffée initiale de l'agoniste et le moment d'entrée en action de l'antagoniste ne devraient pas être affectés lors de l'atteinte d'une cible autre que celle visée initialement. Au contraire, si l'information de la cible initiale joue un rôle important dans l'élaboration du programme moteur, la durée de la bouffée initiale de l'agoniste et le moment d'entrée en action de l'antagoniste seront davantage fonction de la cible initialement présentée et ce, malgré l'atteinte d'une cible différente. Dans tel cas, nous pourrions conclure en faveur de l'importance de la connaissance préalable de la position terminale dans la programmation du mouvement.

Nous pensons que la connaissance préalable de la position terminale permet de structurer une séquence d'activation agoniste-antagoniste caractérisant un mouvement d'atteinte rapide. Ainsi, la durée de la bouffée initiale de l'agoniste et le moment d'entrée en action de l'antagoniste varieront en fonction de la position terminale prévue. De plus, nous croyons que dans un mouvement d'atteinte rapide, en présence d'une modification imprévue de la position terminale, la séquence d'activation sera modifiée de façon telle que le moment d'entrée en action de l'antagoniste sera devancé lorsque la cible initialement rapprochée sera modifiée en faveur d'une cible plus éloignée et retardé lorsque la cible initialement éloignée sera modifiée en

faveur d'une cible plus rapprochée.

## CHAPITRE II

### METHODOLOGIE GENERALE

#### Sujets

Pour la réalisation de ce mémoire, sept sujets droitiers masculins ne souffrant d'aucun déficit moteur ou sensoriel apparent sont recrutés parmi la population étudiante de l'UNIVERSITE du QUEBEC à TROIS-RIVIERES. L'âge moyen des sujets est de 25.7 ans avec un écart-type de 3.8 ans. Les sujets ont reçus la somme de 15.00\$ pour leur participation à l'expérience.

#### Tâche du sujet

La tâche du sujet consiste à exécuter une flexion de l'épaule laquelle entraîne le bras vers une cible spécifique. Pour ce faire, le sujet doit d'abord maintenir son bras à la position de départ, ce qui définit l'angle '0' degré. A partir de ce moment une cible parmi les trois proposées s'illumine. Dès lors, il est permis au sujet de prendre le temps qu'il lui plaira avant de lancer son mouvement. Une fois amorcé, le mouvement doit être exécuté à vitesse maximale. Un maximum de 600 ms est accordé au sujet pour réaliser son mouvement.

Pour être considéré précis, l'arrêt du mouvement doit

avoir eu lieu à l'intérieur d'un intervalle de plus ou moins quatre degrés de part et d'autre de la cible. Un mouvement est jugé acceptable lorsque les conditions de temps et de précision sont respectées. Tout essai ne satisfaisant pas à une de ces conditions est remis en banque et repris plus tard. Après l'exécution de chaque mouvement un chronomètre numérique affiche la précision obtenue. Le feedback sur le temps de mouvement n'est fourni au sujet que lors des essais ratés sur cette condition.

#### Description du montage

Trois plaquettes portant chacune une lumière rouge sont disposées sur un arc de cercle devant lequel le sujet est confortablement assis. Chacune des lumières constitue une cible potentielle: cible 1 à l'angle de 70 degrés, cible 2 à 85 degrés et cible 3 à 100 degrés (figure 2). Afin d'aider le sujet à repérer l'apparition d'une nouvelle cible en cas de changement de cible en cours de mouvement, une rangée de trois petites lumières vertes est disposée au dessus de l'unique lumière rouge (cible principale) de chaque plaquette. Sur chaque plaquette, les lumières vertes reproduisent l'ensemble des cibles principales et sont placées de manière à ce que chaque lumière verte soit alignée avec sa cible correspondante sur la plaquette qui lui est propre. Ainsi, sur la plaquette 3, c'est la lumière verte 3 qui est alignée avec la lumière rouge (figure 3).

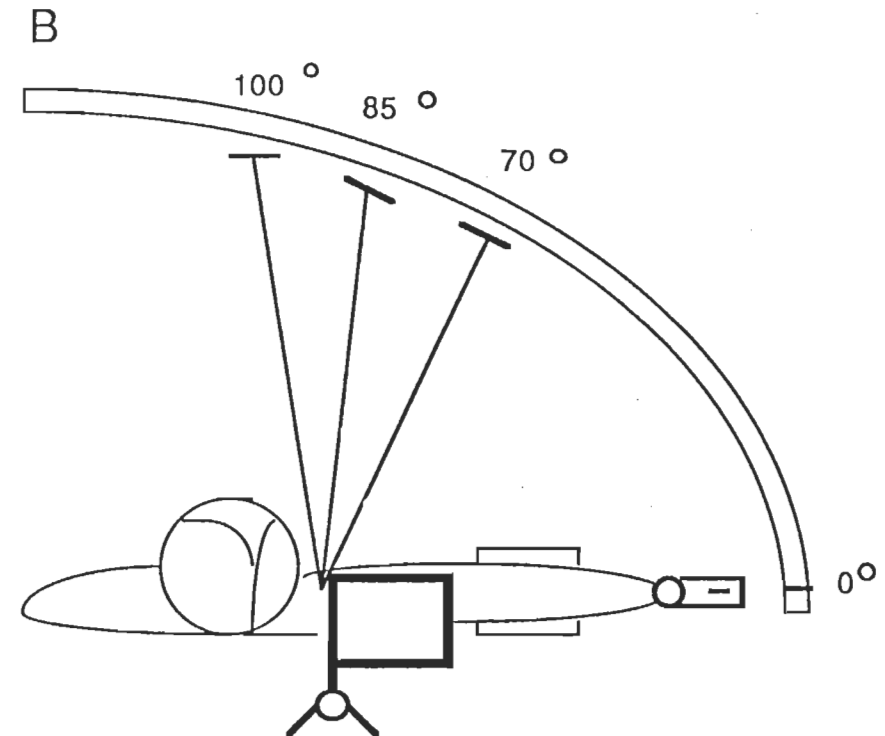
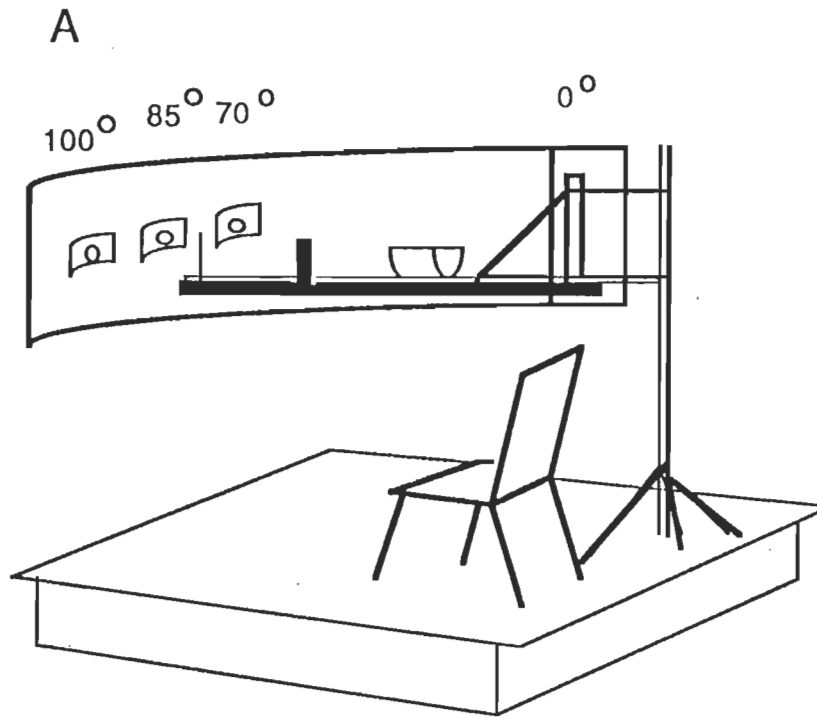


Figure 2. Schéma représentant le montage expérimental. Le bras pivotant constitue le rayon de la portion de cercle formée par l'agencement des plaquettes sur le panneau les supportant. Dans chaque plaquette est fichée une cible principale (lumière rouge) surmontée de trois lumières vertes disposées horizontalement (partie gauche, 2a). La cible 1 se situe à 70 degrés, la cible 2 à 85 degrés et la cible 3 à 100 degrés. La position de départ (0 degré) est représentée par une droite à l'extrémité du panneau. La partie droite (2b) illustre le montage expérimental vu de dessus alors que le bras du sujet est maintenu à la position de départ.

Le bras droit du sujet est maintenu en extension dans un support pivotant lequel permet au membre de former un angle de 90 degrés avec le tronc. Ce support représente donc le rayon de la portion de cercle créée par l'agencement des plaquettes (figure 2). De cette façon, nous nous assurons de l'homogénéité des positions des cibles pour tous les sujets. Sur la partie supérieure du support pivotant se trouve un potentiomètre linéaire lequel nous permet une détermination précise des angles parcourus lors du mouvement. Au bout du support, une poignée ajustable maintient l'avant-bras du sujet en demi-pronation et permet une meilleure prise de l'appareil. Il est également possible de modifier la position du support en hauteur de façon à favoriser une position confortable de l'épaule et du tronc chez chacun des sujets. A l'extrémité du support un pointeur vertical (16 cm de hauteur; 6 mm de diamètre) agit en guise d'aide visuel permettant l'alignement précis entre les yeux du sujet et la cible visée. Le support et la chaise du sujet sont solidement fixés au sol garantissant ainsi une position uniforme chez tous les sujets. De plus, les sujets sont ceinturés à la chaise pendant l'expérience.



## Procédures

Dans 85% des essais, la cible atteinte est la même que la cible présentée initialement (condition témoin). La particularité de cette expérience vient du fait que la cible initialement présentée au sujet n'est pas toujours celle qu'il doit finalement atteindre. En effet, dans le cas des autres essais, soit 15%, la cible initialement présentée est modifiée en faveur d'une nouvelle cible (condition expérimentale). Une modification de cible ne peut prendre place que lorsque le mouvement est lancé, c'est-à-dire que lorsque l'amorce du mouvement est sanctionnée selon le critère d'un déplacement d'un degré ou plus. Par ailleurs, le sujet fait face à une autre condition témoin dans laquelle les modifications de cibles sont impossibles.

Un sujet exécute un total de 324 essais répartis sur trois séances. Chaque séance dure de 20 à 30 minutes, ce qui permet d'accomplir les trois séances de façon consécutive. Une séance typique se subdivise en trois parties: une première de 44 mouvements modifiables (condition MOD), c'est-à-dire dont la cible initiale est susceptible d'être modifiée en faveur d'une nouvelle cible; la deuxième partie se compose de 21 mouvements non-modifiables (condition NON-MOD), c'est-à-dire qu'en aucun cas, il ne peut se produire de modification de cible. Finalement, une troisième partie constituée de 43 essais à nouveau modifiables. Au total des trois séances, le sujet exécute 261 mouvements

modifiables contre 63 non-modifiables (tableau 1, Annexe A).

### Séance d'entraînement

Avant de participer à l'expérimentation proprement dite, chaque sujet est soumis à une séance de familiarisation avec le montage, les procédures et les différentes conditions de tâche à effectuer. Les sujets doivent alors exécuter en premier lieu 30 mouvements d'entraînement en condition non-modifiable suivi de 45 mouvements de type modifiable. L'entraînement se poursuit de cette façon jusqu'à ce que le nombre d'essais ratés par le sujet représente un taux d'erreurs de temps ou de précision inférieur à 20%, ce qui est généralement atteint en moins de 40 minutes.

### Déroulement d'un essai

La cible initiale est représentée par la lumière rouge de l'une des trois plaquettes. Lorsque qu'une modification de cible se produit, on voit s'illuminer sur la plaquette initiale, après que le critère d'un degré soit atteint, la lumière verte correspondant à la position de la nouvelle cible. En même temps la cible initiale s'éteint et la nouvelle cible s'allume alors sur sa plaquette propre. Lorsqu'aucune modification n'a lieu, seule la première lumière rouge s'illumine. Par exemple, en cas de

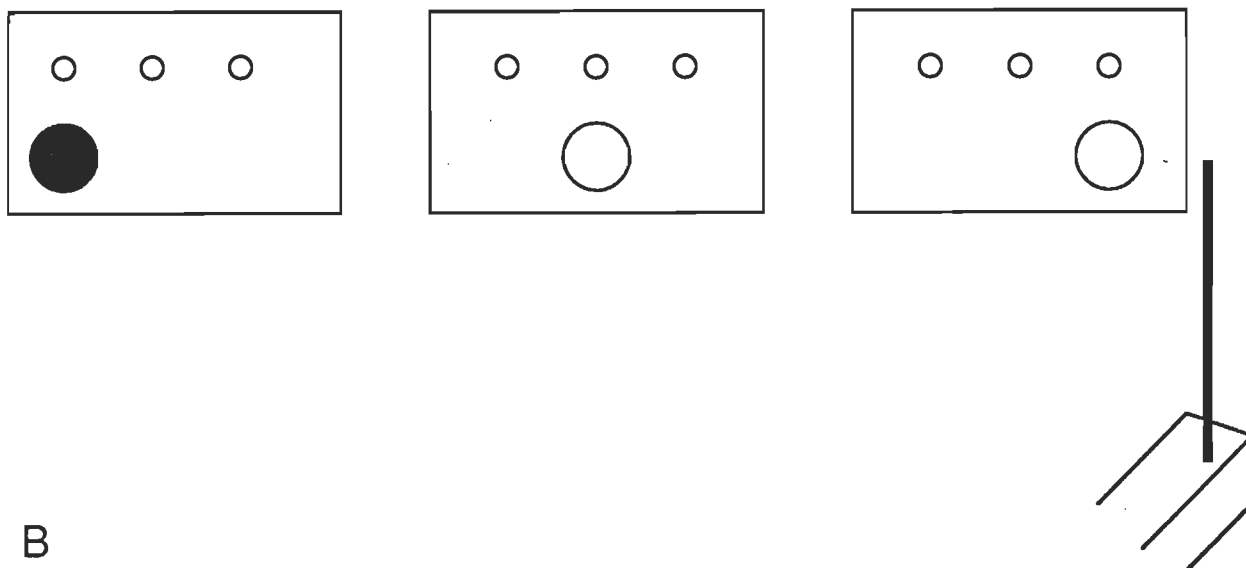
modification, il est possible d'obtenir le déroulement suivant: le bras du sujet est appuyé dans la base de départ ('0' degré), la cible 3 (lumière rouge) s'illumine, le sujet se prépare au mouvement, l'amorce. Après la course d'un degré, la petite lumière verte indiquant une modification à la cible 1 s'allume, alors qu'en même temps, la cible 3 s'éteint et la cible 1 (lumière rouge) s'illumine sur sa plaquette propre (figure 3). Le sujet doit donc modifier le mouvement entrepris pour la cible 3 en faveur de l'atteinte de la cible 1 nouvellement présentée.

### Mesures

Le recueil et le traitement des données s'effectuent à l'aide d'un micro-ordinateur de type 'Apple II Plus'. Le temps s'écoulant entre la présentation de la cible et l'amorce du mouvement représente le temps de latence, c'est-à-dire la période dans laquelle le sujet se prépare au mouvement qu'il doit exécuter. Le mouvement est considéré amorcé lorsque le bras a franchi la distance d'un degré sur sa course. Cette mesure définit le début de l'enregistrement du temps de mouvement (TM).

Lors de l'exécution de chacun des mouvements, les signaux électromyographiques (EMG) des muscles grand pectoral (agoniste) et deltoïde postérieur (antagoniste) sont recueillis au moyen d'électrodes de surface Ag-AgCl 'Beckman' de 9 mm de diamètre fixées à l'aide d'une solution

A



B

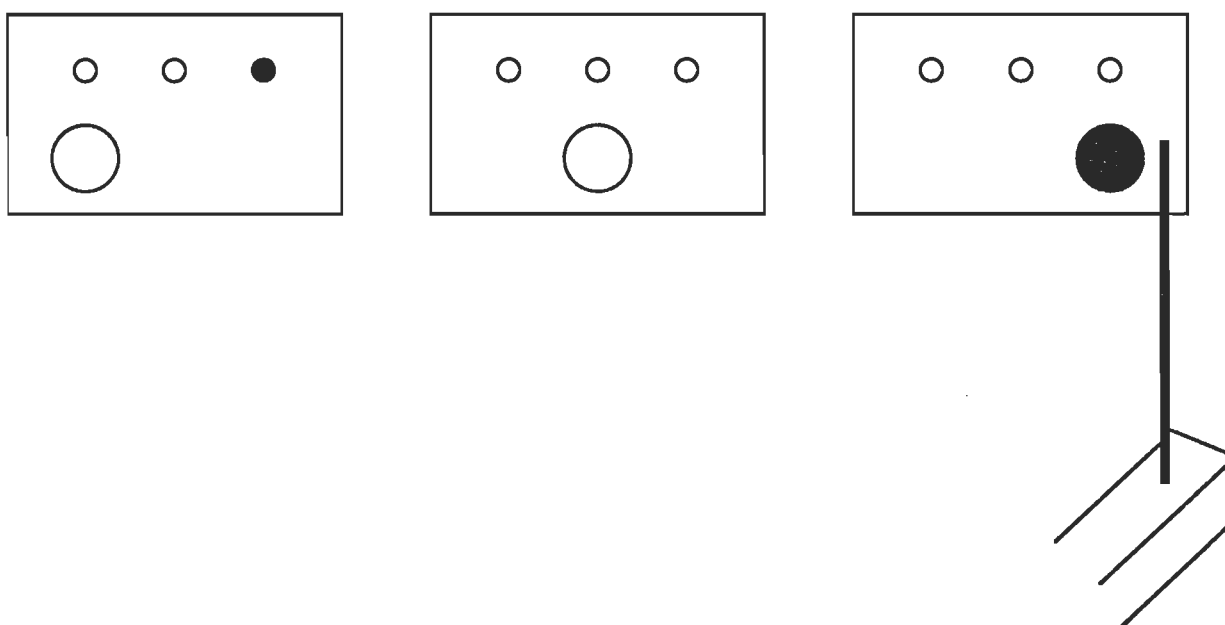


Figure 3. Disposition des cibles principales 1, 2 et 3 surmontées des trois lumières vertes disposées horizontalement. La figure illustre le niveau de cible 3-1 en condition modifiable (Mod). La figure 3a représente la cible initiale 3 illuminée sur sa plaquette. La figure du bas (3b) illustre la modification de cible alors que la cible initiale 3 s'éteint et qu'au même moment s'allume la petite lumière verte indiquant une modification en faveur de la cible 1 et la nouvelle cible effective sur sa plaquette correspondante.

électrolytique. Afin d'assurer le meilleur contact possible entre la peau et l'électrode, l'impédance est vérifiée à l'aide d'un appareil de marque Grass, modèle EZM 3. L'impédance est considérée acceptable lorsqu'inférieure à 5 KOhms. Les électrodes sont reliées à deux amplificateurs de marque Grass P511 dotés de filtres pour éliminer les basses et les hautes fréquences et le signal de 60 cycles. Le seuil de coupure des basses fréquences est situé à 30 hertz et celui des hautes fréquences à 1,000 hertz.

La procédure d'enregistrement est la suivante: les signaux EMG bruts sont recueillis et amplifiés. Le gain est de 5,000 pour le muscle agoniste et de 10,000 pour le muscle antagoniste. Une fois amplifiés, les signaux sont rectifiés au moyen d'un intégrateur. Nous échantillons l'enveloppe résultante à une fréquence de 100 hertz au moyen d'une carte de conversion analogique à numérique, huit bits, de marque 'Mountain Hardware'.

Les données relatives au déplacement du bras sont pour leur part enregistrées au moyen d'un potentiomètre relié à une carte de conversion analogique à numérique, 12 bits, de marque 'Lawson Laboratories'. L'échantillonnage du signal de déplacement s'effectue à un taux de 400 hertz.

Une procédure proposée par le professeur Louis Laurencelle de l'U.Q.T.R., nous permet de recueillir non seulement les signaux EMG et de déplacement à partir du moment où le mouvement s'amorce mais aussi l'activité EMG tant agoniste qu'antagoniste pour une période de 300 ms

précédant le début du mouvement. Dans un tampon circulaire de 30 lectures, nous enregistrons aux fréquences citées plus haut les signaux qui nous intéressent. Dès l'amorce du mouvement, la procédure permet de conserver les 30 dernières lectures, celles-ci constituant le tampon, correspondant à la phase pré-déplacement.

La mesure de la précision est d'une importance capitale dans ce projet. Grâce à la carte 12 bits, notre erreur de mesure est inférieure à .2 degré. Le besoin de la plus grande précision possible est justifié par le fait que nous nous intéressons au point dans l'espace marquant le premier arrêt du mouvement sans tenir compte des oscillations du membre qui peuvent suivre ce premier arrêt. Ces oscillations sont relatives aux gestes de correction ou de stabilisation du mouvement. Notre procédure nous permet de détecter le moment et le point approximatifs où la vitesse du mouvement devient nulle. Ce point correspond au premier arrêt sur la cible que le sujet cherche à atteindre. La technique utilisée à cette fin est la suivante: une bande de 16 lectures consécutives de potentiomètre agit comme référence. A mesure que le mouvement progresse, la bande des 16 lectures est renouvelée par l'abandon de la plus ancienne valeur et l'addition d'une nouvelle. A chaque insertion, la moyenne des 5 dernières et la moyenne des 5 premières lectures sont calculées (1) et leur différence est comparée

(1) Le rapport 5/16 a été choisi comme hypothétiquement optimal entre la limite 1/16, sensible à détecter le mouvement s'il a cours, et la limite 8/16, de variance moindre, plus propice lorsque le mouvement est arrêté.

à un critère d'arrêt donné, lequel correspond à la valeur '0'. Si la différence des moyennes calculées est positive, cela indique que le mouvement est en cours et le point d'arrêt n'est pas reconnu. Dès que la différence des moyennes devient négative ou nulle, on considère, comme point d'arrêt, la valeur médiane de la bande de 16 lectures. L'enregistrement des données EMG et de déplacement cesse à ce moment, même si le mouvement reprend par ailleurs. Ces données sont conservées sur disquette ainsi que tous les renseignements relatifs aux essais échantillonnés.

#### Essais échantillonnés

Dans la banque d'essais modifiables, la probabilité qu'il y ait une modification de cible effective est de 15%. Pour éviter que les probabilités conditionnelles fassent en sorte que la modification d'une cible éloignée soit plus facilement prédictible que celle d'une cible rapprochée, il faut un nombre d'essais décroissant de la cible la plus rapprochée à la plus éloignée (tableau 1, Annexe A). Pour chacun des 12 niveaux de cibles, quatre essais réussis sont échantillonnés au hasard à travers les trois séances. Nous avons choisi des échantillons de 4 essais à cause des probabilités croissantes d'apparition de la cible, ce qui auraient exigé des sujets un nombre exagéré d'essais pour augmenter la taille de l'échantillon. La taille choisie pour les échantillons constitue donc la taille minimum permettant

aux sujets un nombre total acceptable d'essais. Comme chaque échantillon est de taille égale, nous pouvons les comparer l'un à l'autre.

Les informations relatives à un essai conservé représentent des données d'identification ou des variables utilisées pour l'analyse. Il s'agit de : numéro de l'essai, code des conditions de l'essai, temps de latence, temps de mouvement, précision, données de déplacement, activité EMG pré-déplacement et déplacement pour le muscle agoniste, activité EMG pré-déplacement et déplacement pour le muscle antagoniste.

A partir des mesures de temps de mouvement et de distance effectivement parcourue, il est possible de calculer la vitesse angulaire moyenne de chaque mouvement. Les données de déplacement sont manipulées selon une technique de 'vincentisation' prescrite par le professeur Louis Laurencelle. Par cette technique, il est possible de ramener sur une même base de temps les tracés de déplacement appartenant aux mêmes niveaux de cible. Les bases de temps choisies représentent la moyenne de temps de mouvement de tous les sujets selon que la cible atteinte est la cible 1, 2 ou 3. Par exemple, toutes les courbes concernant les niveaux où la cible 1 est atteinte sont vincentisées sur une base temporelle de 360 ms; tant qu'aux courbes des niveaux où les cibles 2 et 3 sont atteintes, elles sont ramenées respectivement sur la base temporelle de 418 et 482 ms. Cette manoeuvre a pour but de rendre comparables et



analysables les essais pour lesquels la cible atteinte est la même.

Les données de déplacement ont d'abord été lissées à l'aide de la technique de lissage 'BUTTERWORTH' (Challis et Kitney, 1983), et vincentisées sur les bases temporelles citées plus haut. A partir des données de déplacement, nous avons dérivé, par la première et la deuxième différence, les tracés de vitesse (lissés et vincentisés) et d'accélération (vincentisés). Ces tracés ont été traités selon les critères de temps cités plus haut.

A partir des tracés d'accélération, il est possible de déterminer les variables suivantes: durée d'accélération, durée de décélération, moment d'accélération maximale et moment de décélération maximale (figure 4).

Les données d'activité EMG sont aussi soumises à la technique de vincentisation. Il faut se rappeler que les tracés EMG échantillonnés contiennent de l'information pré-déplacement et déplacement. La figure 5 donne un exemple des tracés typiques des activités EMG agoniste et antagoniste en illustrant les tracés obtenus lors d'un essai au niveau de cible 3-1.

Aux critères temporels de vincentisation utilisés pour les données relatives au déplacement, il faut ajouter une période d'échantillonnage de 300 ms avant le début du mouvement. Les bases temporelles de vincentisation deviennent donc de 660, 718 et 782 ms pour les cibles 1, 2 et 3 respectivement. Les tracés EMG agoniste et antagoniste

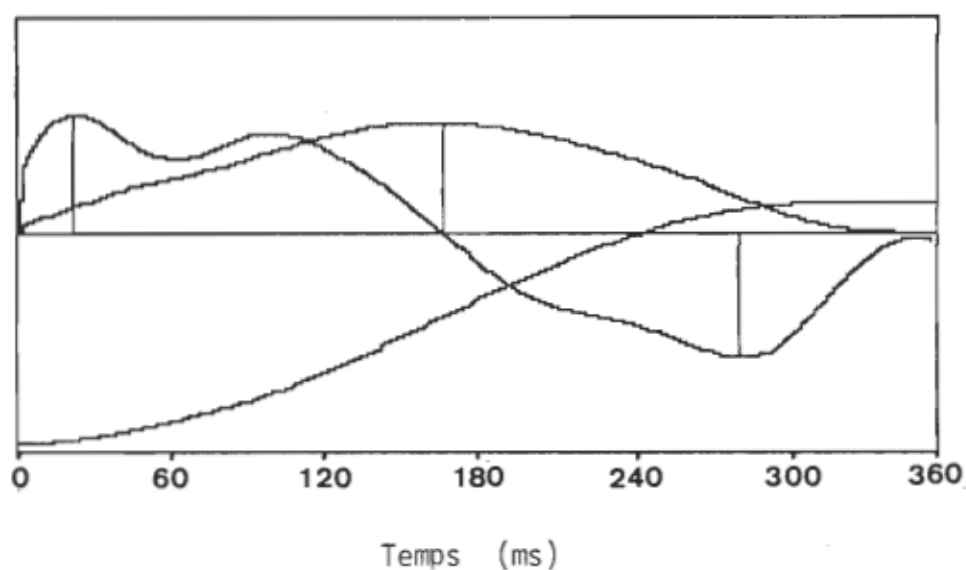


Figure 4. Tracés de déplacement (a), de vitesse (b) et d'accélération (c) tirés du niveau de cible 3-1. Les tracés sont lissés et vincentisés sur la base temporelle de 360 ms. Les verticales indiquent: le moment d'accélération maximale (d), le moment de vitesse maximale (e) et le moment de décélération maximale (f).

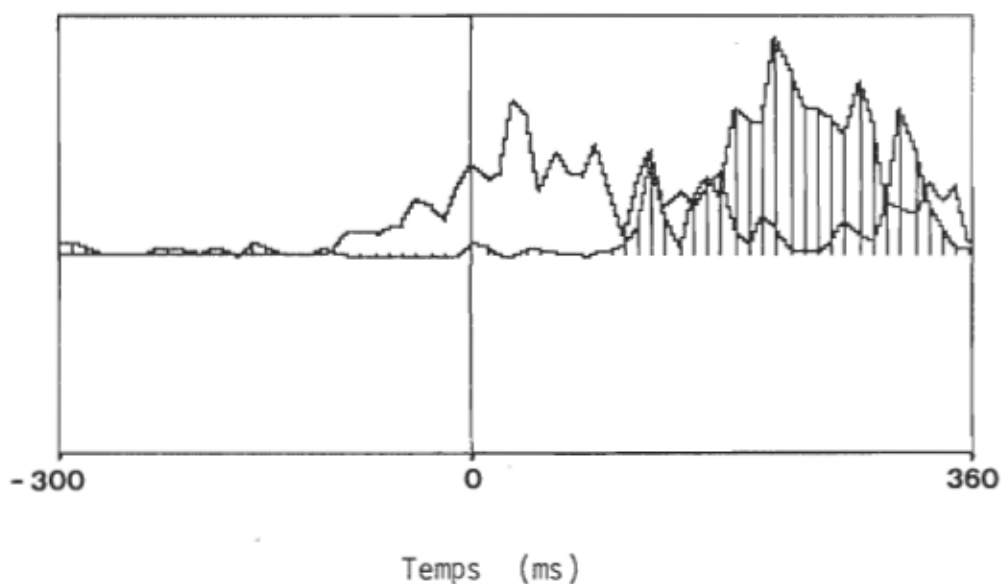


Figure 5. Tracés intégrés de l'activité EMG des muscles agoniste et antagoniste tirés du niveau de cible 3-1. Les tracés sont vincentisés sur la base temporelle de 660 ms. Le tracé clair représente l'activité agoniste alors que le tracé hachuré représente l'activité antagoniste. La verticale marque le début du déplacement.

ont d'abord été vincentisés un à un et ensuite moyennés par niveau de cible pour donner 24 tracés types (12 agonistes et 12 antagonistes) de chacun des 12 niveaux de cible pour les sept sujets. De ces tracés il est possible de déterminer les variables suivantes: moment de l'entrée en action de l'antagoniste, durée de l'antagoniste, durée de l'agoniste pré-déplacement et durée de la bouffée agoniste initiale (comprenant la partie pré-déplacement et la première partie déplacement). Chaque moment ou durée est déterminé à l'aide d'une technique informatisée. Pour le moment d'entrée en action de l'antagoniste, nous calculons le temps écoulé entre le début du déplacement et le moment où le signal EMG de l'antagoniste quitte son niveau de base. Pour les durées de l'activité EMG agoniste et antagoniste, nous calculons le temps écoulé entre le moment où le signal EMG quitte définitivement son niveau de base et le moment où il y revient. En ce qui concerne la durée de l'agoniste en phase pré-déplacement, nous calculons le temps écoulé entre le moment où le signal EMG quitte définitivement son niveau de base et le moment où le déplacement s'amorce.

Pour fins d'analyses statistiques, les tracés EMG ont été divisés en périodes d'activité. La division est la suivante et tout à fait arbitraire: le déplacement se divise en cinq périodes d'activité, à partir du début du déplacement. Selon que la cible atteinte soit la cible 1, 2 ou 3, la longueur des périodes est variable. Pour la cible 1, les périodes seront d'une durée de 72 ms, de 83 ms pour

la cible 2 et de 96 ms pour la cible 3. La période 1 est celle qui suit le début du mouvement. Elle contient la principale portion de la première bouffée agoniste alors que l'antagoniste y est absent. La période 2 représente le temps où l'agoniste atteint généralement son maximum. Durant ce temps, l'antagoniste demeure silencieux. Dans la période 3, l'agoniste se montre généralement silencieux alors que durant ce temps, l'antagoniste atteint son maximum. La période 4 présente un silence relatif de l'agoniste et une activité antagoniste décroissante. Finalement, la période 5 se rapporte à la fin du mouvement.

A partir de ces divisions, il est possible de situer le ratio agoniste/antagoniste selon chacune des périodes et d'en suivre l'évolution tout au long du mouvement. On procède d'abord au calcul de la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) de l'activité EMG agoniste et antagoniste pour une période donnée. Chaque valeur de REQM est transformée par le logarithme naturel. Le ratio est obtenu en faisant la différence des logarithmes naturels des REQM agonistes et des REQM antagonistes.

#### Analyse des résultats

En résumé, nous isolons les variables: temps de latence, temps de mouvement, précision, vitesse angulaire, durée de l'accélération, durée de la décélération, moment d'accélération maximale, moment de décélération maximale,

moment de l'entrée en action de l'antagoniste, durée de l'antagoniste, durée de l'agoniste pré-déplacement et durée de la bouffée initiale de l'agoniste (comprenant la partie pré-déplacement et la première partie déplacement). Chacune de ces variables a été soumise à l'analyse de variance pour une dimension à mesures répétées dans trois plans distincts (soit un par cible atteinte). Le facteur répété était le facteur 'conditions' (MOD (3 niveaux) et NON-MOD (1 niveau)).

Pour leur part, les variables: ratios EMG agoniste/antagoniste ainsi que les REQM agonistes et les REQM antagonistes des 5 périodes dérivées lors du déplacement furent soumis à l'analyse de variance pour deux dimensions avec mesures répétées sur la deuxième dimension et ce, pour chacune des cibles atteintes. Ces analyses ont été faites selon le facteur 'périodes' (5 niveaux). Le facteur répété était le facteur 'conditions' (MOD (3 niveaux) et NON-MOD (1 niveau)). Toutes ces analyses ont été effectuées à partir du logiciel B.M.D.P. Pour leur part, les pourcentages des erreurs de précision (PEP) et des erreurs de temps (PET) sont analysés de façon descriptive seulement.

## CHAPITRE III

### RESULTATS

#### Variables contrôles

Avant d'aborder les résultats proprement dits, il est nécessaire d'examiner certaines variables contrôles. D'abord, chaque échantillon de 4 essais fut comparé à la population des essais d'où il était tiré dans le but de s'assurer de la conformité des échantillons à leur population d'origine. Ces comparaisons ont été faites sur la base du temps de mouvement à l'aide du test 't' de Student. Au total, 70 comparaisons (10/sujets \* 7 sujets) furent effectuées et en trois occasions seulement nous avons obtenu une différence significative au seuil  $p < .05$ . La fréquence des comparaisons significatives est donc de .043, ce qui est inférieur à ce que le hasard seul aurait pu produire. Ces résultats nous autorisent à analyser les données en toute confiance.

Deux autres variables contrôles furent examinées dans le but de s'assurer qu'une condition particulière n'ait pas contraint les sujets à un nombre exagéré d'essais pour réussir la tâche. Il s'agit des pourcentages d'erreurs regroupant les erreurs de précision et celles de temps.

### Pourcentage d'essais ratés

Nous avons calculé les pourcentages d'essais ratés sur la base de la précision et du temps afin de déterminer les types d'essais les plus difficiles et les plus susceptibles d'avoir été repris souvent par le sujet. Tel qu'attendu, ce sont les essais modifiés qui furent le plus souvent ratés et ce dans une proportion variant entre 12.5% (niveau 2-3; cette expression signifie que la cible 2 a été modifiée pour la cible 3 dans cette condition) et 56.5% (niveau 3-1). Les figures 6 et 7 donnent un aperçu des pourcentages d'erreurs selon la précision et le temps.

### Pourcentage d'essais présentant une erreur de précision

La figure 6a indique que les conditions où la cible est susceptible d'être modifiée et celles où il n'y a pas de modification engendrent un taux d'erreur faible et homogène. Sur la figure 6b, on remarque que les niveaux de cible exigeant un mouvement plus court que prévu (niveaux 2-1, 3-1 et 3-2) produisent un taux d'erreurs de précision plus élevé avec respectivement 31.1, 56.5 et 27.3% (tableau 2, Annexe A).



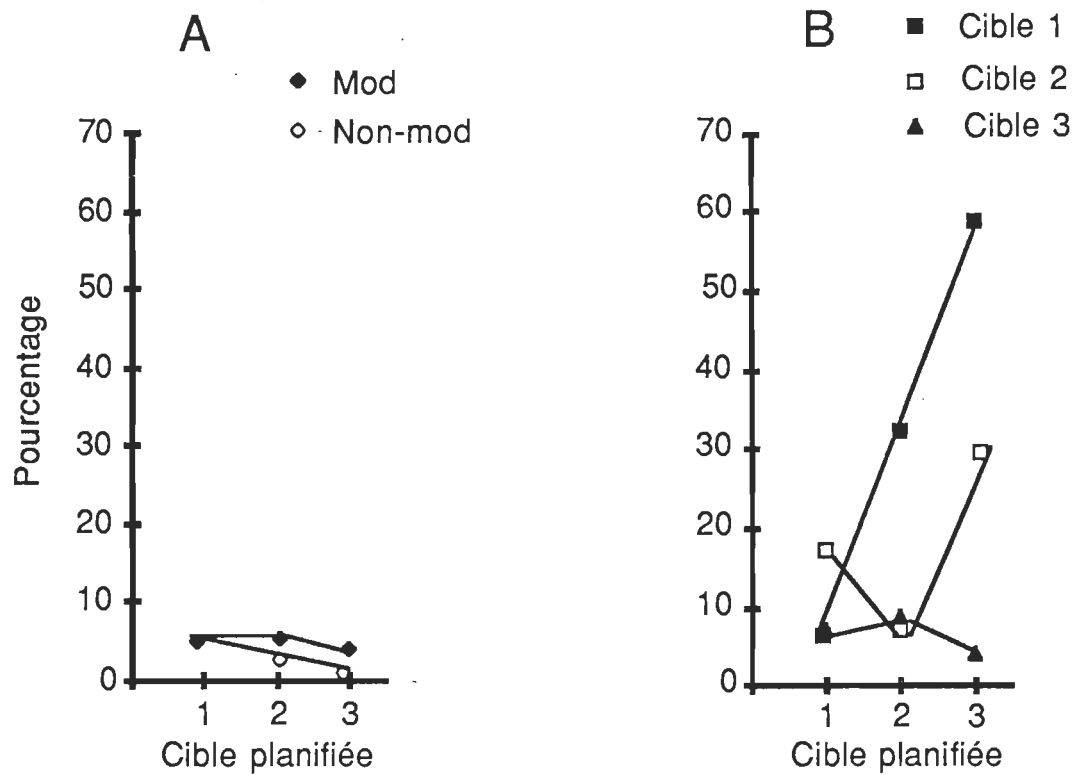


Figure 6. Pourcentage d'essais présentant une erreur de précision en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (6a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (6b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

### Pourcentage d'essais présentant une erreur de temps

La figure 7a fait voir peu de différence entre les erreurs de temps des conditions où la cible est susceptible d'être modifiée et celles où il n'y a pas de modification. Dans les deux cas, le taux d'erreurs est faible. Dans la figure 7b, on remarque que le niveau 1-3 engendre plus d'erreurs avec un pourcentage de 29.9% alors que pour les autres niveaux le taux varie entre 0% et 9.1% (tableau 2, Annexe A). Les niveaux de cibles les plus difficiles à réaliser ont donc été, pour la précision, le niveau 3-1 et pour le temps, le niveau 1-3.

### Résultats

Avant d'aborder l'examen des résultats, le lecteur devra prendre note de deux considérations importantes. D'abord, pour la clarté de l'exposé, il est nécessaire de rappeler les différents codes qui désignent les conditions de mouvements analysés. Le code 'NON-MOD' fait référence aux mouvements pour lesquels le sujet sait que la possibilité d'une modification de cible est nulle. Le code 'MOD' fait référence aux mouvements lors desquels une modification de cible est possible dans 15% des essais. Sous ce code, les différents niveaux de cibles sont désignés selon la cible initiale et la cible effective. Par exemple, le code 3-1

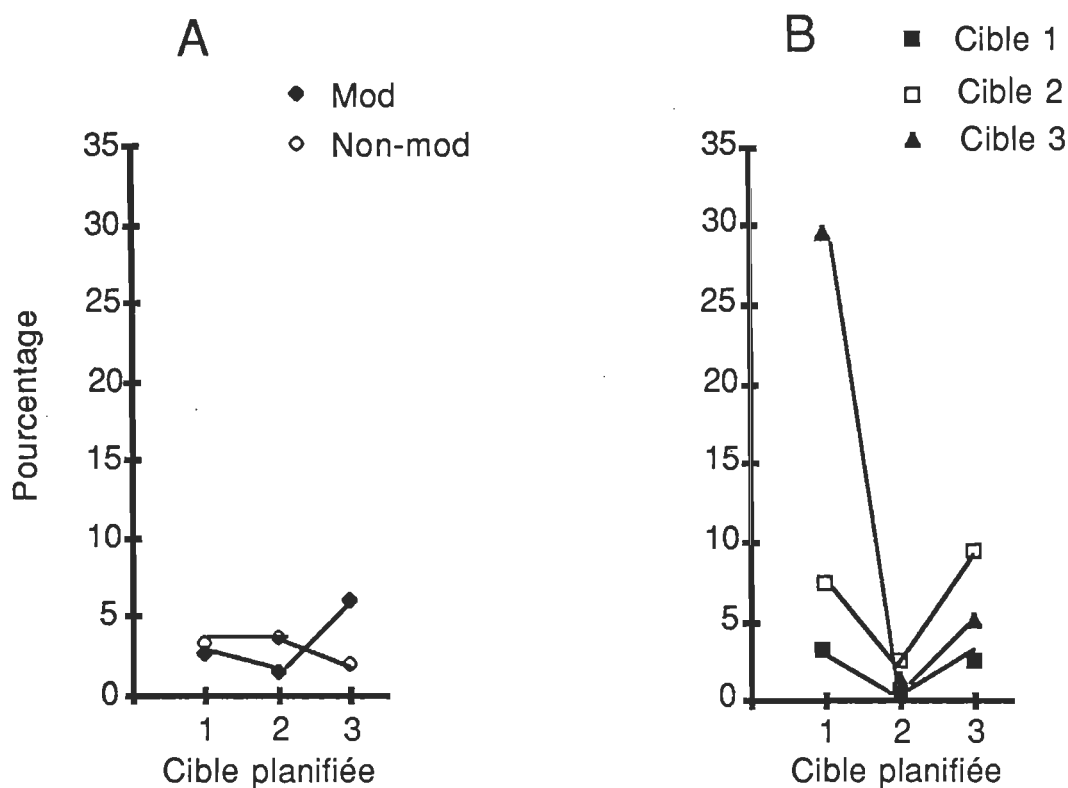


Figure 7. Pourcentage d'essais présentant une erreur de temps en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (7a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (7b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

indique que le sujet amorce son mouvement pour la cible 3 et le modifie pour la cible 1. Le code 2-2 indique pour sa part un mouvement à la cible 2 alors qu'il n'y a pas eu de modification de cible, bien qu'elle fût possible.

De plus, afin d'aider le lecteur dans l'examen des résultats, il est préférable de donner des éclaircissements concernant les représentations graphiques des résultats obtenus. A l'aide de la figure 8, il s'agit de préciser l'allure et la signification que pourraient prendre les tracés des résultats selon les conditions MOD et NON-MOD. A titre d'exemple des relations anticipées, la figure 8a représente les tracés hypothétiques que l'on pourrait obtenir lorsque la cible planifiée et effective est la même en condition MOD et NON-MOD. Ce genre de tracé illustrerait une relation en fonction de l'éloignement de la cible. Afin de distinguer l'effet de la cible planifiée et/ou celui de la cible effective, il faut se reporter sur les figures 8b, 8c, 8d et 8e qui désignent les tracés hypothétiques relatifs à la condition MOD seulement. La figure 8b nous montre ce que serait les tracés imputables à l'effet de la cible effective seulement, sans effet de la cible planifiée. La figure 8c indique des tracés superposés qui reflèteraient un effet de la cible planifiée seulement, sans effet de la cible effective. La figure 8d illustre des tracés qui reflèterait à la fois un effet de la cible planifiée et un effet de la cible effective. Finalement, la figure 8e donne aussi la représentation de ce que serait un effet conjoint

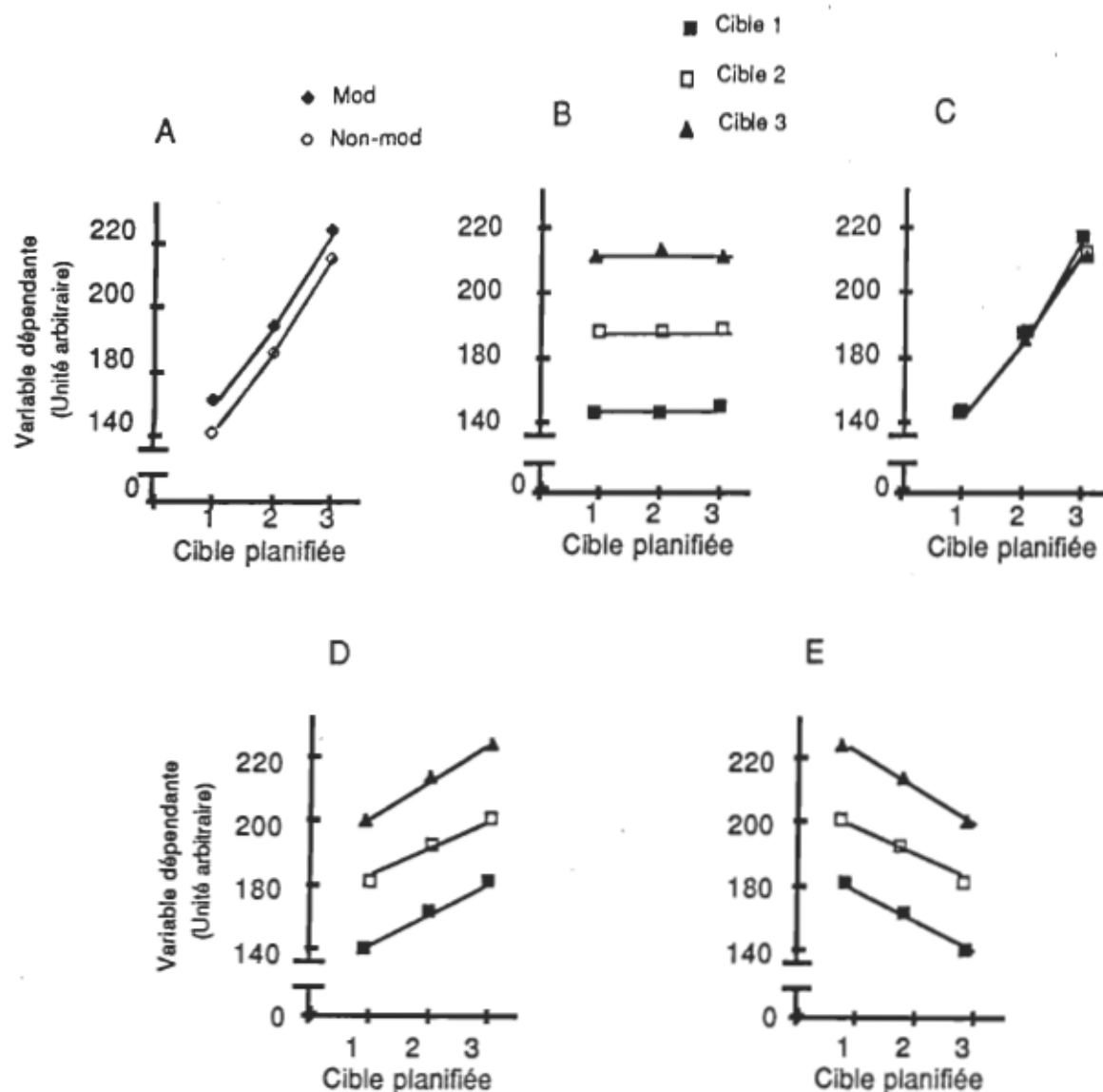


Figure 8. Tracés hypothétiques des résultats selon l'effet de la cible planifiée et/ou de la cible effective. La figure 8a présente l'effet obtenu alors que la cible planifiée et effective est la même (conditions Mod et Non-mod). Les figures 8b à 8e désignent les tracés relatifs à la condition Mod seulement. La figure 8b indique l'effet de la cible effective seulement. La figure 8c indique l'effet de la cible planifiée seulement. Les figures 8d et 8e illustrent un effet conjoint de la cible planifiée et effective.

de la cible planifiée et effective. Ces considérations seront importantes pour la compréhension des représentations graphiques lors du compte-rendu des résultats.

Enfin, les variables suivantes n'ont pas affiché de différences significatives selon les 12 niveaux de cibles. Il s'agit des variables: précision ( $F(3,18) = 1.50, p > .05$  pour la cible 1,  $F(3,18) = .80, p > .05$  pour la cible 2 et  $F(3,18) = 1.16, p > .05$  pour la cible 3), moment d'accélération maximale ( $F(3,18) = .42, p > .05$  pour la cible 1,  $F(3,18) = .94, p > .05$  pour la cible 2 et  $F(3,18) = 1.65, p > .05$  pour la cible 3) et durée de l'activité antagoniste ( $F(3,18) = 1.03, p > .05$  pour la cible 1,  $F(3,18) = 1.52, p > .05$  pour la cible 2 et  $F(3,18) = 1.23, p > .05$  pour la cible 3). Ainsi, sur la base de ces variables, nous n'avons pu déceler ni un effet de la cible planifiée, ni un effet de la cible effective. De plus, afin d'éviter de surcharger le compte-rendu des résultats, seules les différences significatives au seuil  $p < .01$  seront rapportées, sauf à de très rares exceptions.

### Temps de latence

Les sujets n'étant pas en situation de temps de réaction, ils ont la consigne de prendre le temps qui leur paraît nécessaire, après l'apparition de la cible, avant d'engager le mouvement. Ce temps pris entre l'apparition de la cible et l'amorce du mouvement représente le temps de

latence (TL) c'est-à-dire le temps pris par le sujet afin de se préparer au mouvement. La variable TL présente des différences significatives pour la cible 1,  $F(3,18) = 6.99$ ,  $p < .01$ , pour la cible 2,  $F(3,18) = 5.84$ ,  $p < .01$  et la cible 3,  $F(3,18) = 4.38$ ,  $p < .01$ . Afin de localiser les différences, le test à posteriori Tukey A fut employé. Pour la cible 1, une différence a été décelée entre les niveaux NON-MOD et 3-1,  $Q(4,18) = 6.25$ ,  $p < .01$ . Pour la cible 2, la seule différence déterminée fut entre le niveau NON-MOD et le niveau 2-2,  $Q(4,18) = 5.85$ ,  $p < .01$ . Pour la cible 3, aucune différence ne fut détectée à un seuil  $p < .05$ .

La figure 9 nous renseigne sur le comportement des TL selon que les sujets sont en condition MOD ou NON-MOD. En condition MOD, la planification de la cible 2 entraîne un TL plus long particulièrement en fonction du niveau de cible 2-2 qui affiche un TL de 1219.57 ms (tableau 3, Annexe A). La préparation de la cible 2 en condition modifiable représente une difficulté peu commune. En effet, le sujet doit s'attendre qu'en cas de modification, son mouvement soit plus long (niveau 2-3) ou plus court (niveau 2-1). Ce type de mouvement nécessite probablement plus de temps de préparation étant donné la complexité accrue due à une éventuelle modification de cible.

On s'aperçoit qu'en condition NON-MOD, les TL sont relativement uniformes. La principale conclusion à tirer de la variable TL est sans nulle doute que lorsque le sujet sait qu'aucune modification ne sera possible, son temps de

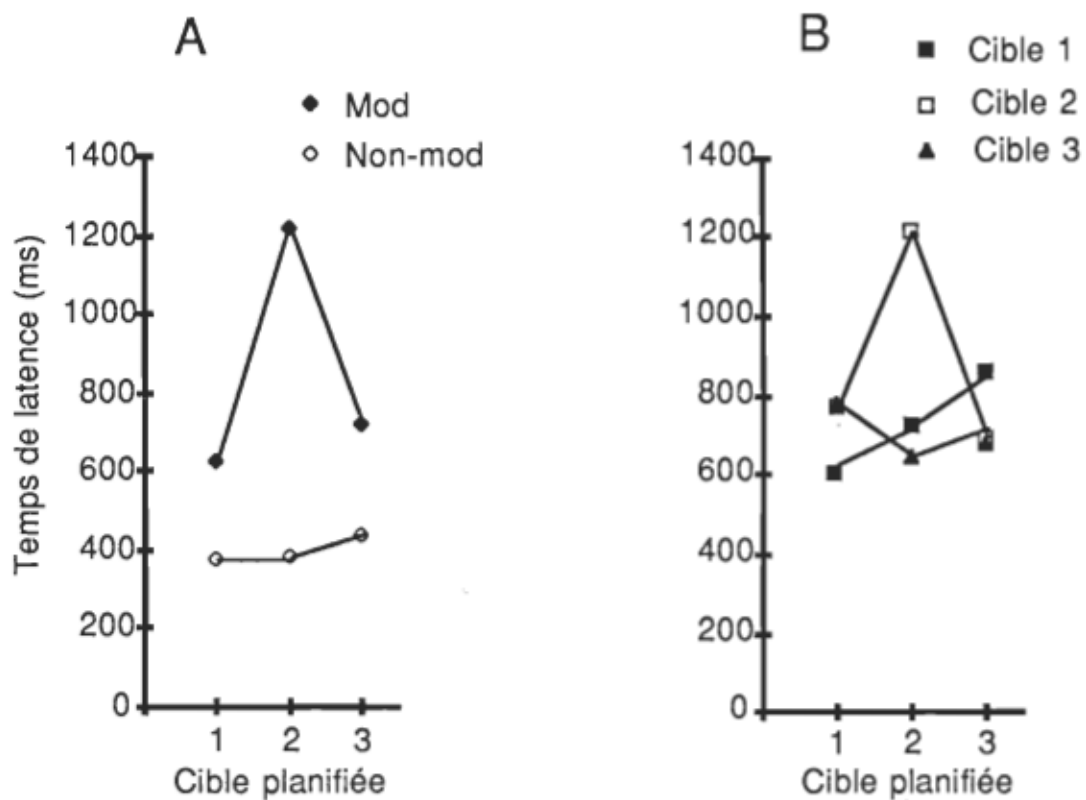


Figure 9. Temps de latence en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (9a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (9b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.



préparation au mouvement est nettement plus court que lorsqu'une modification est possible. La condition MOD incite le sujet à se préparer davantage en raison de la plus grande difficulté que représente cette condition.

### Temps de mouvement

La variable temps de mouvement (TM) présente des différences significatives. L'analyse de variance a révélé des différences significatives pour la cible 1,  $F(3,18) = 6.06$ ,  $p < .01$ , pour la cible 2,  $F(3,18) = 8.57$ ,  $p < .01$  et la cible 3,  $F(3,18) = 9.7$ ,  $p < .01$ . Le test Tukey A localise une différence, pour la cible 1, entre les niveaux 3-1 et NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.52$ ,  $p < .01$ . Pour la cible 2, la différence est située entre le niveau 1-2 et le niveau 3-2,  $Q(4,18) = 6.94$ ,  $p < .01$ . En ce qui concerne la cible 3, on constate des différences entre le niveau 1-3 et les niveaux 3-3,  $Q(4,18) = 6.25$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.46$ ,  $p < .01$  et entre les niveaux 2-3 et 3-3,  $Q(4,18) = 5.16$ ,  $p < .01$ .

La figure 10a nous illustre les TM moyens obtenus en condition MOD, alors qu'aucune modification ne fut effective, et en condition NON-MOD. Tel qu'attendu, le TM augmente en fonction de l'éloignement de la cible atteinte. Pour sa part, la figure 10b nous renseigne sur les TM obtenus lors des essais exécutés en condition MOD, qu'il y ait eu modification ou non. On s'aperçoit ici qu'en cas de

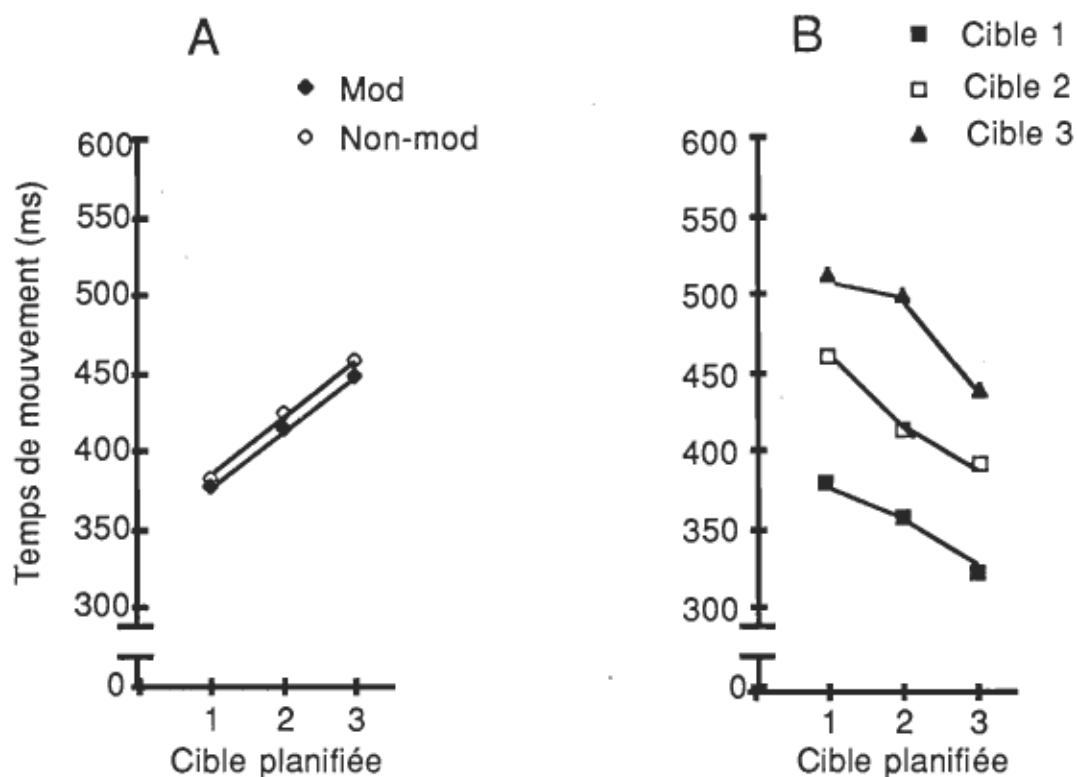


Figure 10. Temps de mouvement en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (10a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (10b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

modification, plus une cible planifiée est éloignée, plus vite on atteint une cible rapprochée. Par exemple, au niveau 3-1, l'atteinte de la cible 1 alors que le mouvement est prévu pour la cible 3 entraîne un TM de 339.52 ms comparativement à un TM de 377.5 ms lorsque la cible 1 est atteinte après avoir été prévue, en condition NON-MOD (tableau 4, Annexe A). Au contraire, au niveau 1-3, où la cible atteinte est plus éloignée que la cible préparée, le TM augmente. Dans ce cas, on constate un TM de 515.95 ms alors que la même cible 3 est atteinte en 447.77 ms après avoir été planifiée (tableau 4, Annexe A).

Le TM est bien sûr influencé par la cible effective et est proportionnel à la distance franchie. Cependant, lors d'une modification de cible, on remarque que le TM diminue ou augmente selon que le mouvement est plus court ou plus long que prévu. C'est donc que le TM se montre aussi sensible à la cible initialement présentée. En fait, le TM résulte du rapport vitesse/amplitude du mouvement. Comme la planification d'un mouvement court provoque une vitesse moindre que la planification d'un mouvement long, le TM doit allonger si une modification de cible fait allonger le mouvement. A l'inverse, la planification d'un long mouvement entraîne une plus grande vitesse. Ainsi, lors d'une modification, une cible rapprochée est atteinte en un TM moins grand. Comme nous le verrons plus loin dans le texte, une modification de cible n'affecte pas ou peu la vitesse de mouvement, c'est donc dans le TM que se traduit l'effet de

la présentation d'une nouvelle cible.

### Vitesse angulaire moyenne

La vitesse angulaire moyenne (VAM) est obtenue par le calcul du rapport de la distance franchie en degrés par le temps de mouvement. L'analyse de variance a décelé des différences significatives au niveau de la cible 1,  $F(3,18) = 7.04$ ,  $p < .01$ , de la cible 2,  $F(3,18) = 6.49$ ,  $p < .01$  et de la cible 3,  $F(3,18) = 9.12$ ,  $p < .01$ . Le test à posteriori Tukey A situe la différence, pour la cible 1, entre le niveau 3-1 et le niveau NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.92$ ,  $p < .01$ . Pour la cible 2, la différence est entre les niveaux 1-2 et 3-2,  $Q(4,18) = 6.12$ ,  $p < .01$ . Finalement, la cible 3 présente des différences entre le niveau 1-3 et les niveaux 3-3,  $Q(4,18) = 5.87$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.42$ ,  $p < .01$ .

Sur la figure 11a, on constate que la VAM augmente en fonction de l'éloignement de la cible planifiée. Sur la figure 11b, les VAM tirées des essais en condition MOD font aussi voir les augmentations de la VAM en fonction de la cible planifiée et ce, même si une cible rapprochée est finalement atteinte. Par exemple, on remarque que le niveau 3-1 entraîne une vitesse moyenne de 208.9 degrés/seconde comparativement à une vitesse de 186.2 degrés/seconde pour le niveau NON-MOD à la cible 1. La planification d'une cible éloignée provoque une vitesse d'exécution plus grande. Au

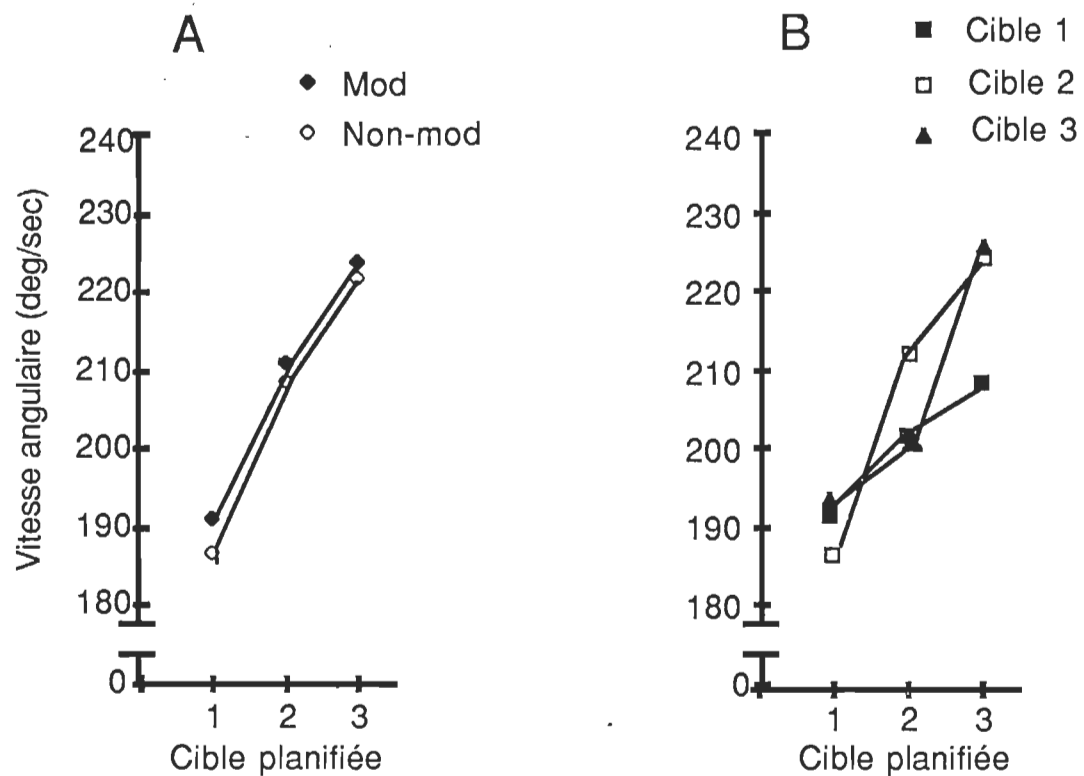


Figure 11. Vitesse angulaire en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (11a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (11b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

niveau de cible 1-3, on constate que la cible 3 est atteinte à une vitesse moyenne de 195.5 degrés/seconde alors qu'au niveau 3-3 la vitesse est de 224 degrés/seconde (tableau 5, Annexe A). On s'aperçoit que la vitesse d'exécution semble être réglée sur la base de la cible planifiée puisque les vitesses s'accroissent ou diminuent selon que la cible planifiée est éloignée ou rapprochée, la cible effective influençant peu. Il semble donc que la vitesse, du moins à travers les paramètres qui la contrôlent, soit planifiée en fonction de la cible prévue et que les sujets aient tendance à la conserver même en cas de modification de cible.

#### Durée de l'accélération

Dans cette variable il faut voir le temps consacré à l'accélération (DA). L'analyse de variance a révélé des DA significativement différentes,  $F(3,18) = 6.36$ ,  $p < .01$  au niveau de la cible 1, au niveau de la cible 2,  $F(3,18) = 9.67$ ,  $p < .01$  et de la cible 3,  $F(3,18) = 10.16$ ,  $p < .01$ . Le test à posteriori Tukey A situe les différences, pour la cible 2, entre le niveau 1-2 et les niveaux 3-2,  $Q(4,18) = 7.45$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.11$ ,  $p < .01$ . Finalement, pour la cible 3, les différences sont entre le niveau 1-3 et les niveaux 3-3,  $Q(4,18) = 6.45$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.66$ ,  $p < .01$ . Le niveau 2-3 s'est aussi avéré différent du niveau 3-3,  $Q(4,18) = 5.14$ ,  $p < .01$ . Aucune différence ne fut détectée au seuil  $p < .01$  pour la

cible 1.

La figure 12a illustre les DA alors qu'aucune modification n'a eu lieu. On constate que la durée de l'accélération augmente en fonction de l'éloignement de la cible atteinte. La période consacrée à l'accélération occupe plus de temps si le mouvement s'étend sur une plus grande distance. La figure 12b illustre les DA obtenues en condition MOD. On remarque que les DA subissent l'influence de la cible planifiée. Par exemple, au niveau 3-3, la durée de l'accélération est plus longue (215.98 ms) qu'au niveau 2-3 (175.89 ms) et plus courte au niveau 1-2 (152.29 ms) qu'au niveau 3-2 (195.15 ms). Le tableau 6 (Annexe A) nous permet de résumer les résultats moyens des DA.

Ainsi donc, lorsqu'un long mouvement est planifié, il s'ensuit une plus longue durée d'accélération, ce qui explique la vitesse d'exécution plus grande même si la cible atteinte est rapprochée. A l'inverse, la planification d'un mouvement court entraîne une durée d'accélération moins longue et par le fait même une vitesse d'exécution moins grande et ce même si la cible finalement atteinte se trouve à plus grande distance.

En d'autres mots, la durée de l'accélération est planifiée sur la base de la connaissance de la position de la cible initiale. Que la cible planifiée et la cible atteinte soient les mêmes ou non, la durée de l'accélération est liée à la distance à franchir prévue. On peut donc considérer l'accélération du mouvement comme étant

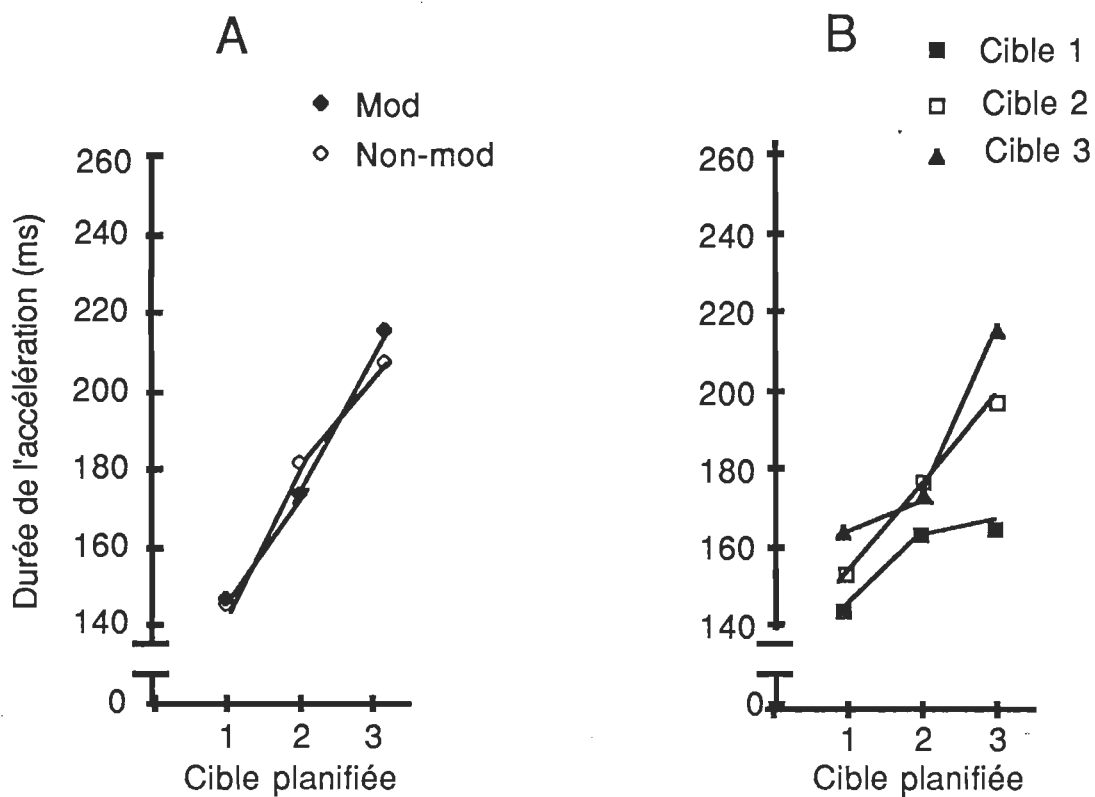


Figure 12. Durée de l'accélération en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (12a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (12b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.



programmée en fonction de la cible planifiée initialement.

A titre descriptif, une analyse des proportions de temps qu'occupe l'accélération fut faite après normalisation des tracés sur la base temporelle de 418 ms (1) (tableau 7, Annexe A). L'analyse de ces proportions ne sert qu'à appuyer les résultats déjà énoncés.

L'effet observé demeure après normalisation. Les proportions des DA varient en fonction de la cible planifiée initialement. Les proportions sont plus faibles lorsqu'un mouvement court est planifié et elles baissent encore plus si le mouvement doit allonger indiquant une plus courte durée de l'accélération dans ces cas. Par contre elles sont plus fortes lorsqu'on planifie un mouvement long et elles augmentent si le mouvement doit être plus court que prévu indiquant cette fois une plus longue durée de l'accélération. Ces données témoignent que la position de la cible prévue est une information sur laquelle le sujet planifie la durée de l'accélération et que ce paramètre se montre plus lié à la cible planifiée qu'à la cible effective.

Nous avons déjà signalé que le moment d'accélération maximale s'avèrait non significativement différent selon les niveaux de cibles. L'illustration en est faite un peu plus clairement à la lumière des données normalisées (tableau 7, Annexe A). On s'aperçoit de l'homogénéité relative des

(1) La base temporelle de 418 ms est choisie en raison du fait qu'elle représente le TM moyen obtenu lors des mouvements à la cible 2, soit la moyenne des moyennes des TM observés.

proportions des moments d'accélération maximale indépendamment de la cible planifiée ou atteinte. Ces données indiquent que la pointe d'accélération maximale se produit sensiblement au même moment lors des mouvements rapides. Ces résultats font écho à ceux rapportés par Gielen et al (1985).

### Durée de la décélération

Cette variable correspond au temps consacré à la décélération (DD). L'analyse de variance a révélé des différences significatives dans les DD au niveau de la cible 1,  $F(3,18) = 6.35$ ,  $p < .01$ , de la cible 2,  $F(3,18) = 9.62$ ,  $p < .01$  et de la cible 3,  $F(3,18) = 10.16$ ,  $p < .01$ . Le test Tukey A situe les différences, pour la cible 2, entre le niveau 1-2 et les niveaux 3-2,  $Q(4,18) = 7.43$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.08$ ,  $p < .01$ . Pour la cible 3, les différences établies sont entre le niveau 1-3 et les niveaux 3-3,  $Q(4,18) = 6.45$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,18) = 5.66$ ,  $p < .01$  et aussi entre le niveau 2-3 et les niveaux 3-3,  $Q(4,18) = 5.18$ ,  $p < .01$ . Aucune différence ne fut détectée au seuil  $p < .01$  pour la cible 1.

La figure 13a fait voir les résultats moyens des DD tirés des essais non modifiés dans la condition MOD et de ceux en condition NON-MOD. On constate qu'en absence de modification, la DD augmente en fonction de la distance à franchir. Plus la cible est éloignée, plus la décélération

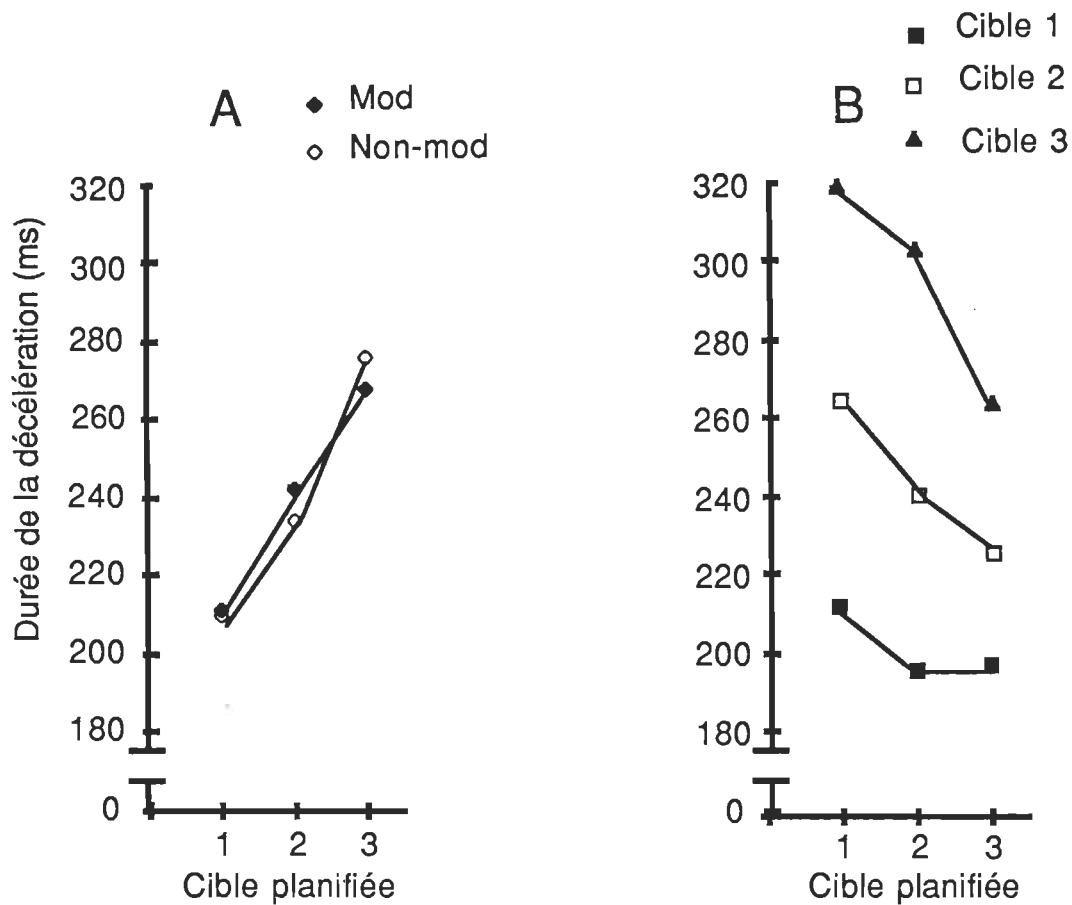


Figure 13. Durée de la décélération en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (13a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (13b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

dure longtemps.

En cas de modifications de cibles on s'aperçoit, sur la figure 13b, que la DD est ajustée en fonction de la cible effective. Au niveau 1-3, la décélération dure plus longtemps (319.19 ms) qu'au niveau 3-3 (266.52 ms) indiquant que l'atteinte d'une cible éloignée après avoir planifié une cible rapprochée prolonge la durée de la décélération. Ainsi, lors d'une modification pour un plus grand mouvement, la décélération s'amorce telle que prévue mais comme le temps de mouvement allonge, la décélération dure donc plus longtemps. En retour, l'atteinte d'une cible rapprochée après la planification d'une cible éloignée (niveau 3-2) fait voir une plus courte durée de décélération (228.28 ms) comparativement à ce qu'on observe au niveau 1-2 (264.91 ms). Cela s'explique en raison du fait que, d'une part, lorsqu'une cible éloignée est planifiée l'accélération dure plus longtemps puisque la décélération est prévue plus tard et que, d'autre part, une modification à une cible rapprochée produit un temps de mouvement moindre laissant donc moins de temps pour la décélération. On retrouve dans le tableau 8 (Annexe A) les résultats moyens concernant les DD pour les 12 niveaux de cibles.

En conclusion, il est permis de considérer la durée de décélération comme étant influencée à la fois par la cible initialement planifiée et la cible effective. La cible initiale permet de prévoir le moment relatif (plus tôt ou plus tard) du début de la phase de la décélération ce qui en

affecte directement la durée, celle-ci s'ajustant à en fonction de la nouvelle cible. Plus on planifie un grand mouvement, plus la décélération est prévue tardive. Dans ces cas, une modification pour une cible rapprochée comprime le temps de mouvement. Ainsi la durée du mouvement est plus courte que prévue et comme la décélération est planifiée tardive, elle doit être d'une durée moindre. Dans le cas où une cible rapprochée est initialement planifiée puis modifiée en faveur d'une plus éloignée, on observe la relation inverse.

Au tableau 7 (Annexe A), toujours à titre descriptif, les proportions des DD nous indiquent en effet que les mouvements non modifiés montrent des proportions de DD relativement homogènes. Les proportions augmentent si le mouvement est plus long que prévu illustrant une décélération qui débute plus tôt et qui dure plus longtemps. Elles diminuent lorsque le mouvement doit être plus court indiquant une décélération qui débute plus tard et qui dure moins longtemps.

#### Moment de décélération maximale

Cette variable rapporte à quel moment particulier apparaît la pointe de décélération maximale. Bien que les seuils de signification soient supérieurs à  $p < .01$ , il est intéressant de constater le comportement de cette variable. Les MD se sont avérés significativement différents,  $F(3,18)$

$= 4.8$ ,  $p < .02$ , pour les niveaux de cibles dont la finale est la cible 1 et  $F(3,18) = 3.95$ ,  $p < .03$ , pour les niveaux dont la cible finale est la numéro 2. Les niveaux à finale 3 n'ont pas atteint le seuil de signification. Le test à postériori Tukey A a décelé les différences suivantes: au niveau de la cible 1, les différences furent notées entre le niveau 3-1 et les niveaux de cible 1-1,  $Q(4,18) = 4.42$ ,  $p < .05$  et NON-MOD,  $Q(4,18) = 4.34$ ,  $p < .05$ . En ce qui concerne la cible 2, une seule différence se remarque entre les niveaux 1-2 et 3-2,  $Q(4,18) = 4.34$ ,  $p < .05$ .

Sur la figure 14a, sont donnés les tracés des MD moyens tirés des essais sans modification. On peut constater que le MD se produit à un moment de plus en plus tardif en fonction de l'éloignement de la cible atteinte. La figure 14b nous montre que si le MD se produit plus tardivement, cela est dû à la planification de la cible puisqu'au niveau 1-1 le MD se produit à 245.07 ms alors qu'au niveau 3-1, le MD est retardé à 266.58 ms (tableau 9, Annexe A). Des résultats similaires sont visibles en ce qui concerne les niveaux où la cible effective est la cible 2. Par exemple, au niveau 1-2, le MD se produit en fonction d'une cible plus rapprochée donc un peu plus tôt (266.34 ms) par rapport au MD du niveau 3-2 qui se produit plus tard (306.16 ms).

Le moment de décélération maximale se trouve donc influencé par la cible planifiée. Il apparaît plus tôt pour une cible initiale rapprochée et plus tard pour une cible éloignée. Bien qu'une modification de cible le fasse varier,

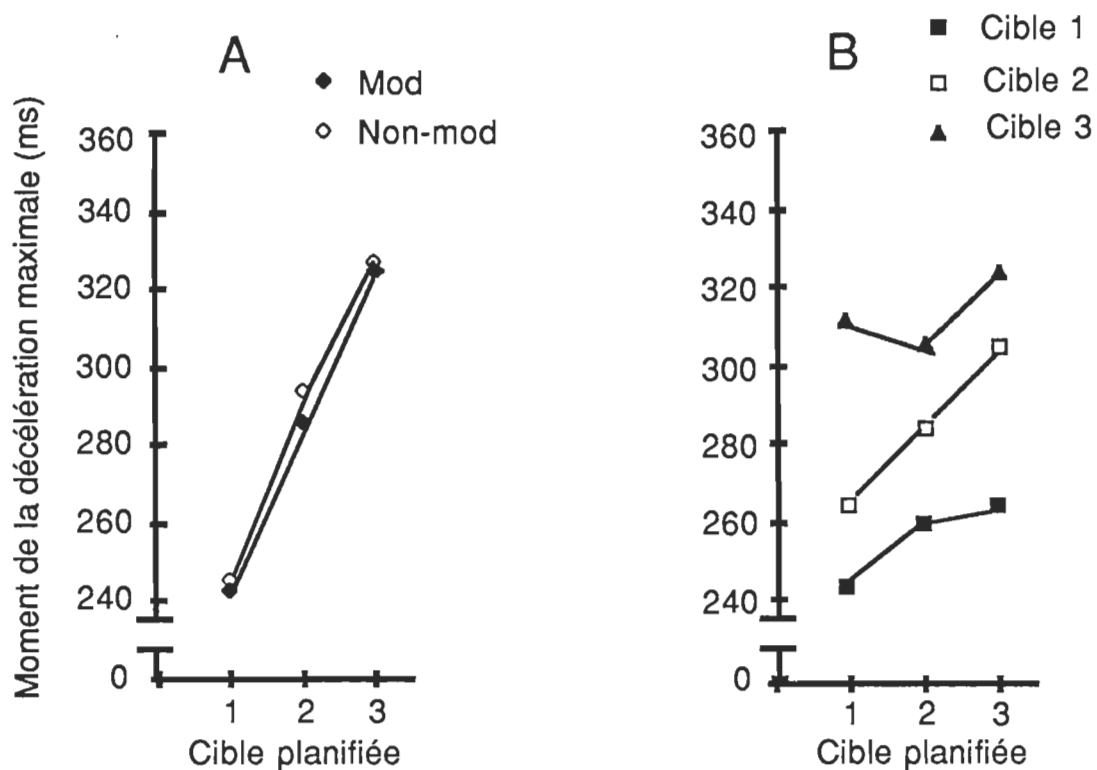


Figure 14. Moment de la Décélération maximale en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (14a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (14b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

on s'aperçoit que le MD est marqué par la cible initiale. Le fait que le moment de décélération maximale se soit montré non significativement différent pour les mouvements se terminant à la cible 3 peut être un argument en faveur du fait que ces longs mouvements permettent des ajustements en cours de route.

Les proportions observées au niveau du MD après normalisation (tableau 7, Annexe A) révèlent que la planification de la cible initiale l'affecte. Cet effet est particulièrement illustré par les conditions où la cible effective est la cible 1 ou 2, après la planification des cibles plus éloignées. Ainsi, plus la cible planifiée est éloignée, plus le MD est retardé. On peut constater que les proportions du MD augmentent dans ces cas. A l'inverse, les mouvements plus longs que prévus font voir que le MD est devancé tel qu'attendu quand une cible rapprochée est planifiée. Pour ces mouvements, les proportions diminuent. En ce qui concerne les essais dont la cible effective est la cible 3, les proportions des MD font preuve d'homogénéité. Ce fait peut donc indiquer que pour ces longs mouvements, il existe une plus grande possibilité d'adaptation, de correction en cours de route puisque le temps le permet.



### Moment d'entrée en action de l'antagoniste

Cette variable est possiblement la plus illustrative de toutes puisqu'elle décrit le moment relatif où le sujet fait intervenir le muscle antagoniste dans le contrôle du mouvement qu'il est entrain d'exécuter. L'activité antagoniste est en fait la cause fondamentale de l'effet de freinage lors d'un mouvement exécuté à grande vitesse. Si le moment d'entrée en action de l'antagoniste (MA) est prévu avant l'amorce du mouvement, c'est donc qu'il est réglé en fonction de la cible planifiée ou son équivalent, c'est-à-dire la position terminale connue à l'avance. Si tel est le cas, des modifications de cible (position terminale prévue) entraîneront des perturbations dans le MA.

Des différences significatives ont été déterminées, d'abord au niveau de la cible 1,  $F(3,15) = 3.74$ ,  $p < .03$ , au niveau de la cible 2,  $F(3,15) = 11.81$ ,  $p < .01$  et de la cible 3,  $F(3,15) = 18.35$ ,  $p < .01$ . Le test à posteriori Tukey A n'a décelé aucune différence au seuil de  $p < .01$  pour la cible 1. Pour la cible 2, les différences furent entre le niveau 1-2 et les niveaux 2-2,  $Q(4,17) = 6.48$ ,  $p < .01$ , 3-2,  $Q(4,17) = 6.49$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,17) = 7.47$ ,  $p < .01$ . En ce qui concerne la cible 3, les différences se trouvent entre le niveau 3-3 et les niveaux 1-3,  $Q(4,17) = 8.19$ ,  $p < .01$  et 2-3,  $Q(4,17) = 7.05$ ,  $p < .01$ . D'autres différences se situent entre le niveau NON-MOD et les niveaux 1-3,  $Q(4,17) = 7.69$ ,  $p < .01$  et 2-3,  $Q(4,17)$

= 6.55,  $p < .01$ .

Considérons d'abord les conditions MOD et NON-MOD sur la figure 15a. On constate que le MA se manifeste plus tardivement en raison de l'éloignement de la cible atteinte. Ainsi donc, plus on planifie un grand mouvement, plus tard intervient le muscle antagoniste si c'est le mouvement prévu qui est réalisé. Pour les cibles 1, 2 et 3, les MA en condition MOD passent respectivement de 69.3 à 116.67 et 154.4 ms alors qu'en condition NON-MOD, ils passent de 72.57, à 125.7 et 149.57 ms (tableau 10, Annexe A).

Sur la figure 15b, on peut voir les tracés des MA moyens tirés de la condition MOD seulement. On remarque que le MA est réglé en fonction de la cible planifiée initialement. Par exemple, la planification de la cible 1 entraîne un MA de 69.3, 56.71 et 74.7 ms selon que la cible atteinte est la cible 1, 2 ou 3. Même si une cible éloignée est atteinte, l'antagoniste entre en action relativement tôt à cause de la planification de la cible 1. A l'inverse, lorsque la cible 1 est atteinte après la planification de la cible 2 ou 3, on s'aperçoit que le MA augmente respectivement de 69.3 (niveau 1-1) à 99 ou 89.4 ms à cause de la planification de la cible éloignée.

On remarque aussi l'effet de planification pour les cibles à finale 3. Les niveaux 1-3, 2-3 et 3-3 entraînent des MA de 74.7, 85.9 et 154.4 ms respectivement. Quant aux niveaux 2-2, 3-2, ils présentent des MA égaux probablement parce qu'ils constituent les MA limites au delà desquels la

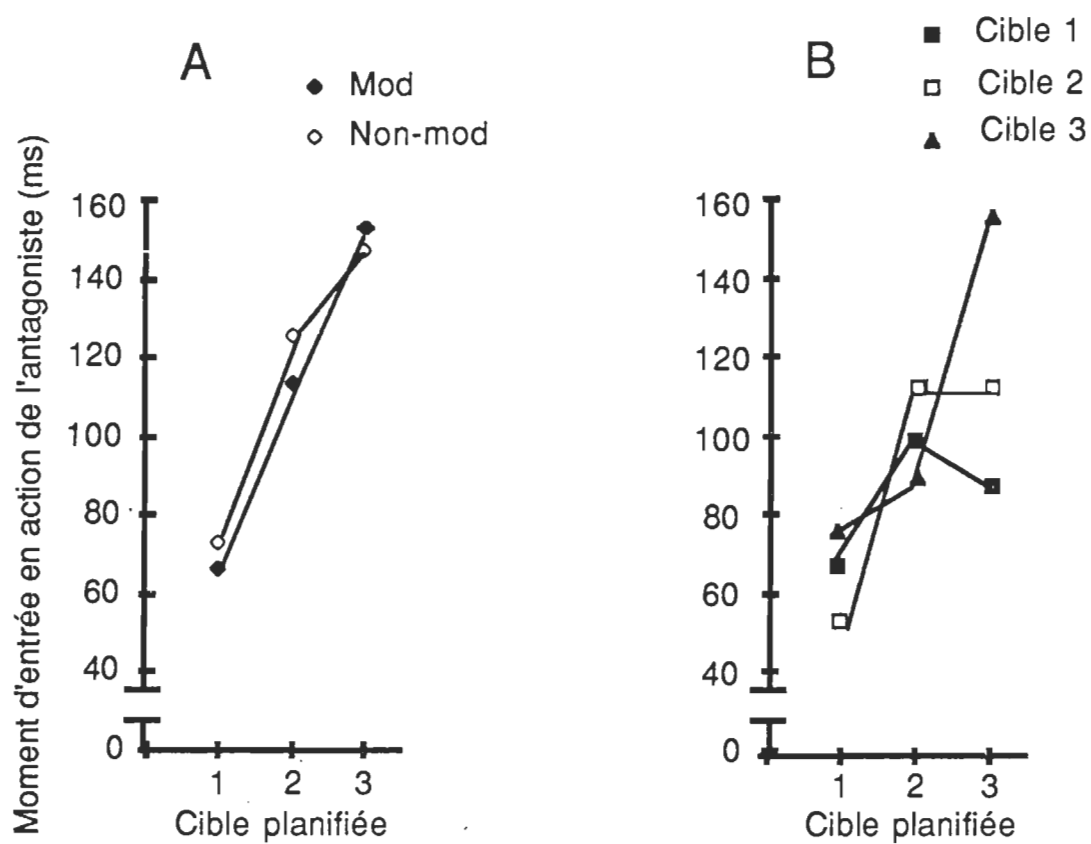


Figure 15. Moment d'entrée en action de l'antagoniste en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (15a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (15b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

cible effective serait dépassée. Pour la même raison, le niveau 3-1 implique un MA de 89.4 ms, plus court que celui observé au niveau 2-1 (99 ms). A cause de la plus grande vitesse provoquée par le niveau 3-1, il est probable qu'un MA de 89.4 ms représente le moment d'activation limite de l'antagoniste permettant d'atteindre la cible 1 avec précision. S'il se produisait plus tard, la cible serait immanquablement dépassée. Le fait que le niveau 3-1 soit celui qui fut le plus souvent raté sur la base de la précision prêche en faveur de cet argument (tableau 2, Annexe A). L'adaptation que nécessitent les mouvements plus courts que prévus soulève l'idée qu'il soit plus facile d'initier l'antagoniste au besoin alors qu'il est latent, puisqu'on vise une cible éloignée, que de le désamorcer après qu'il soit prévu pour une cible rapprochée. Autrement dit, une fois que le programme d'activation de l'antagoniste est déclenché en vertu d'une cible rapprochée, il est plus difficile d'y mettre terme pour s'ajuster à une cible effective éloignée. A l'inverse, quand le mouvement est plus court que prévu, ce programme n'est pas encore activé. Il semble alors plus facile d'en devancer l'activation en fonction de la nouvelle cible.

La grande conclusion à tirer de l'examen de la variable MA est que la cible planifiée prépare le moment d'entrée en action du muscle antagoniste. Malgré la modification de la position de la cible initialement prévue, l'antagoniste a tendance à se comporter selon la prévision établie sur la

base de la cible planifiée, particulièrement pour les mouvements prévus courts.

Au tableau 7 (Annexe A) on peut voir les proportions de temps écoulé avant le MA selon les tracés normalisés. L'effet de la planification de la cible initiale est illustré par une augmentation de la proportion du temps précédant le MA en fonction de l'éloignement de la cible planifiée initialement. Le MA se produit plus tard en raison de la longueur du mouvement prévu. Lorsque le mouvement est planifié court mais qu'il doit se terminer plus loin, le MA se trouve devancé tel que prévu selon la planification d'une cible rapprochée. Les proportions observées diminuent lors de ces mouvements. Les mouvements planifiés longs se montrent moins soumis à la planification puisqu'ils présentent des ajustements permettant l'atteinte de la nouvelle cible. Il apparaît plus facile, dans ces cas, d'activer l'antagoniste plus tôt que prévu si le mouvement est plus court. A l'inverse, lorsque le mouvement est planifié court, le MA se comporte davantage tel que prévu et il semble plus difficile de modifier cette planification même si le mouvement est finalement plus long. Il apparaît donc que la connaissance préalable de la position terminale incite le sujet à préparer le moment où l'antagoniste entrera en action pour jouer son rôle décélérateur, particulièrement pour les mouvements prévus courts.

### REQM des activités EMG agonistes et antagonistes

Le rôle de la variable 'racine de l'erreur quadratique moyenne' (REQM) est de distinguer les variations de l'activité agoniste et antagoniste selon les cinq périodes définies arbitrairement et qui témoignent de la progression du mouvement. Tel qu'expliqué antérieurement, les périodes 1 à 5 illustrent donc le comportement de l'activité EMG agoniste et antagoniste calculée à partir du début du déplacement. On y retrouve des activités EMG agoniste et antagoniste variables selon la cible effective.

Nous examinerons dans un premier temps l'activité agoniste et en deuxième lieu, l'activité antagoniste. Il est entendu que les variables REQM sont transformées par le logarithme naturel et représentent à peu près la surface sous la courbe des activités EMG.

### REQM des activités EMG agonistes

Dans un premier temps, la figure 16 comporte les graphiques des tracés des essais dont la cible initiale n'est pas modifiée. La figure 16a comprend la condition MOD et la 16b, la condition NON-MOD. On peut suivre à l'aide de ces graphiques l'évolution de l'activité agoniste durant les différentes périodes du mouvement. On constate que la période 2 est caractérisée par un agoniste élevé alors qu'il chute à la période 3. Dans les périodes 4 et 5, on assiste à

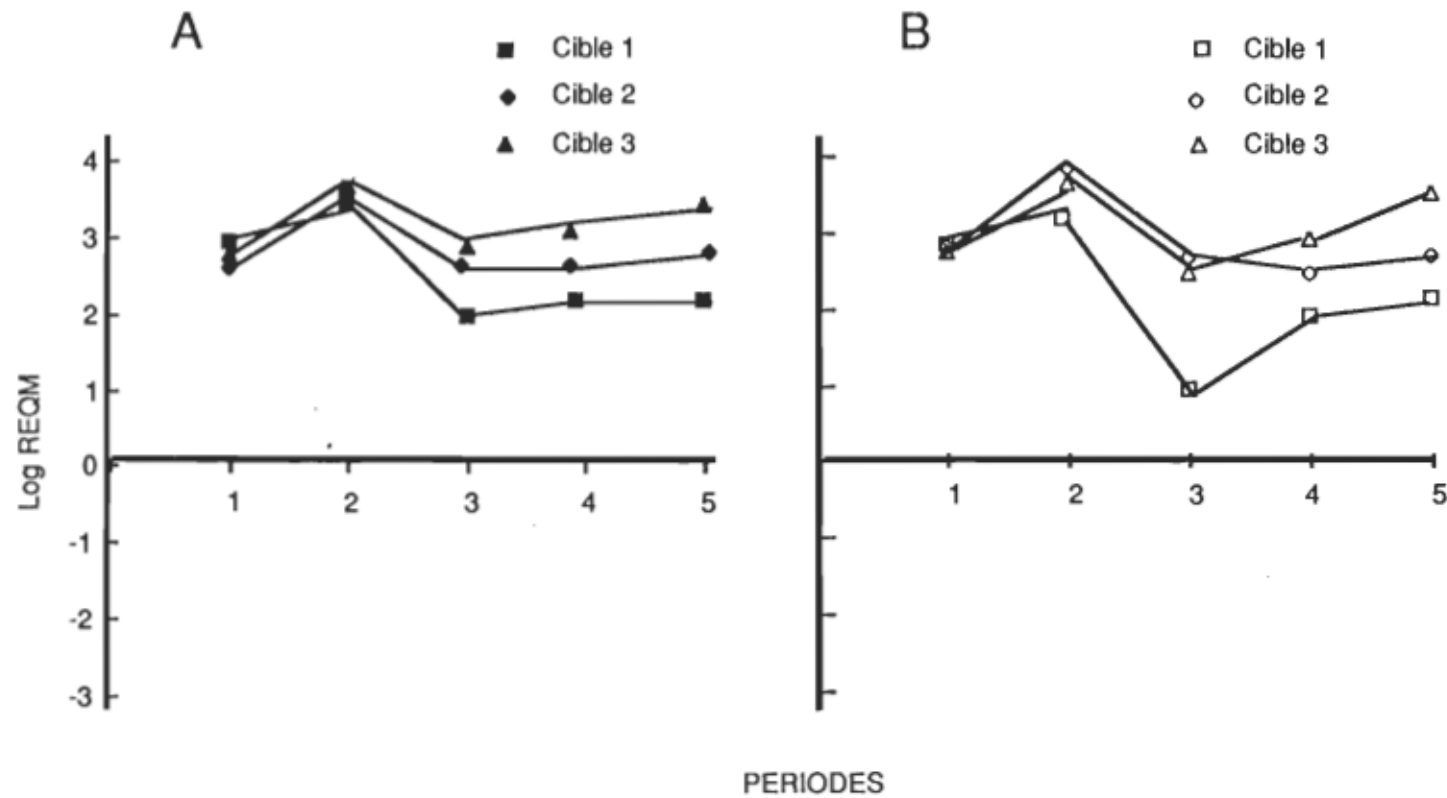


Figure 16. Log REQM de l'activité agoniste en absence de modification, en fonction de chacune des 3 cibles selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (16a) résume les conditions témoins de cible modifiable (Mod). La partie droite (16b) illustre les conditions témoins de cible non modifiable (Non-mod).

une remontée dans l'importance de l'agoniste d'autant plus forte que la cible effective est éloignée.

Lorsqu'une modification de cible est impossible (figure 16b), les tracés suivent le même patron à l'exception de la période 3 pour la cible 1 où le REQM agoniste est à son plus bas. Pour plus de clarté, envisageons le comportement de la variable REQM agoniste selon les trois cibles atteintes.

### Cible\_1

Les tracés des REQM agonistes présentent des différences significatives au niveau des conditions MOD et NON-MOD,  $F(3,18) = 13.14$ ,  $p < .01$ , des périodes  $F(4,24) = 4.46$ ,  $p < .01$  et au niveau de l'interaction conditions \* périodes,  $F(12,72) = 3.39$ ,  $p < .01$ . Afin de situer les différences, le test Tukey A fut appliqué. On remarque qu'à la période 3, le niveau NON-MOD se distingue des niveaux 1-1,  $Q(4,90) = 4.88$ ,  $p < .01$ , 2-1,  $Q(4,90) = 8.88$ ,  $p < .01$  et 3-1,  $Q(4,90) = 9.93$ ,  $p < .01$ . Le niveau 1-1 présente également une différence avec le niveau 3-1,  $Q(4,90) = 5.04$ ,  $p < .01$ . A la période 5, la différence se situe entre le niveau NON-MOD et 3-1,  $Q(4,90) = 4.73$ ,  $p < .01$ .

La figure 17a nous montre les tracés des essais non modifiés à partir desquels on peut constater une chute de l'agoniste à la période 3. Elle est particulièrement marquée en NON-MOD. Cette différence vient du fait qu'au niveau 1-1 une modification demeure toujours possible et cela amène



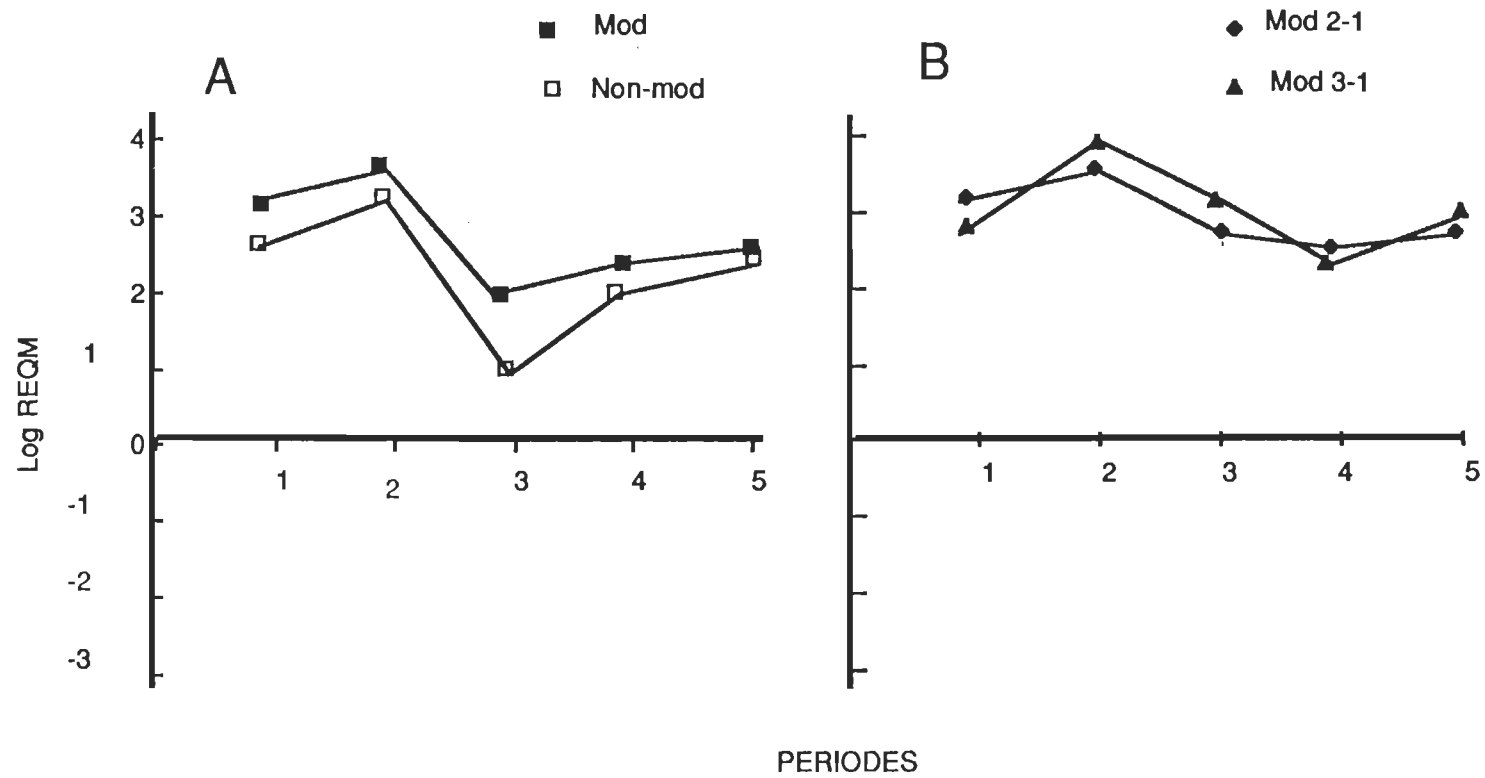


Figure 17. Log REQM de l'activité agoniste en fonction de l'atteinte de la cible 1 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (17a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (17b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 1 après la planification de la cible 2 (Mod 2-1) et après la planification de la cible 3 (Mod 3-1).

l'agoniste à garder un niveau d'activation plus haut comme s'il était en état d'alerte. Aux niveaux 2-1 et 3-1 (figure 17b), l'agoniste est maximum à la période 2 et minimum à la période 4 et non la période 3 comme on l'observe à la figure 17a en absence de modification de cible. C'est conforme aux exigences que pose la planification d'une cible éloignée puisqu'on observe un agoniste plus longtemps actif dans les plus longs mouvements. Le tableau 11 (Annexe A) donne les résultats moyens des REQM agonistes pour la cible 1.

### Cible\_2

L'analyse de variance a déterminé des différences significatives au niveau des conditions,  $F(3,18) = 6.82$ ,  $p < .01$  et de l'interaction conditions \* périodes,  $F(12,72) = 2.02$ ,  $p < .04$ . La variable 'périodes' s'est avérée nonsignificative. Pour la période 3, le test Tukey A a situé les différences entre le niveau de cible 2-2 et les niveaux 3-2,  $Q(4,90) = 4.54$ ,  $p < .01$  et 1-2,  $Q(4,90) = 4.8$ ,  $p < .01$ . A la période 4, deux différences furent déterminées entre les niveaux NON-MOD et 1-2,  $Q(4,90) = 5.2$ ,  $p < .01$  et les niveaux 2-2 et 1-2,  $Q(4,90) = 4.8$ ,  $p < .01$ .

Sur la figure 18a, on remarque les tracés similaires des REQM agoniste obtenus des essais sans modification de cible. La période 2 est toujours caractérisée par une augmentation du REQM agoniste alors qu'on enregistre une chute à la période 3. La figure 18b nous fait voir que les

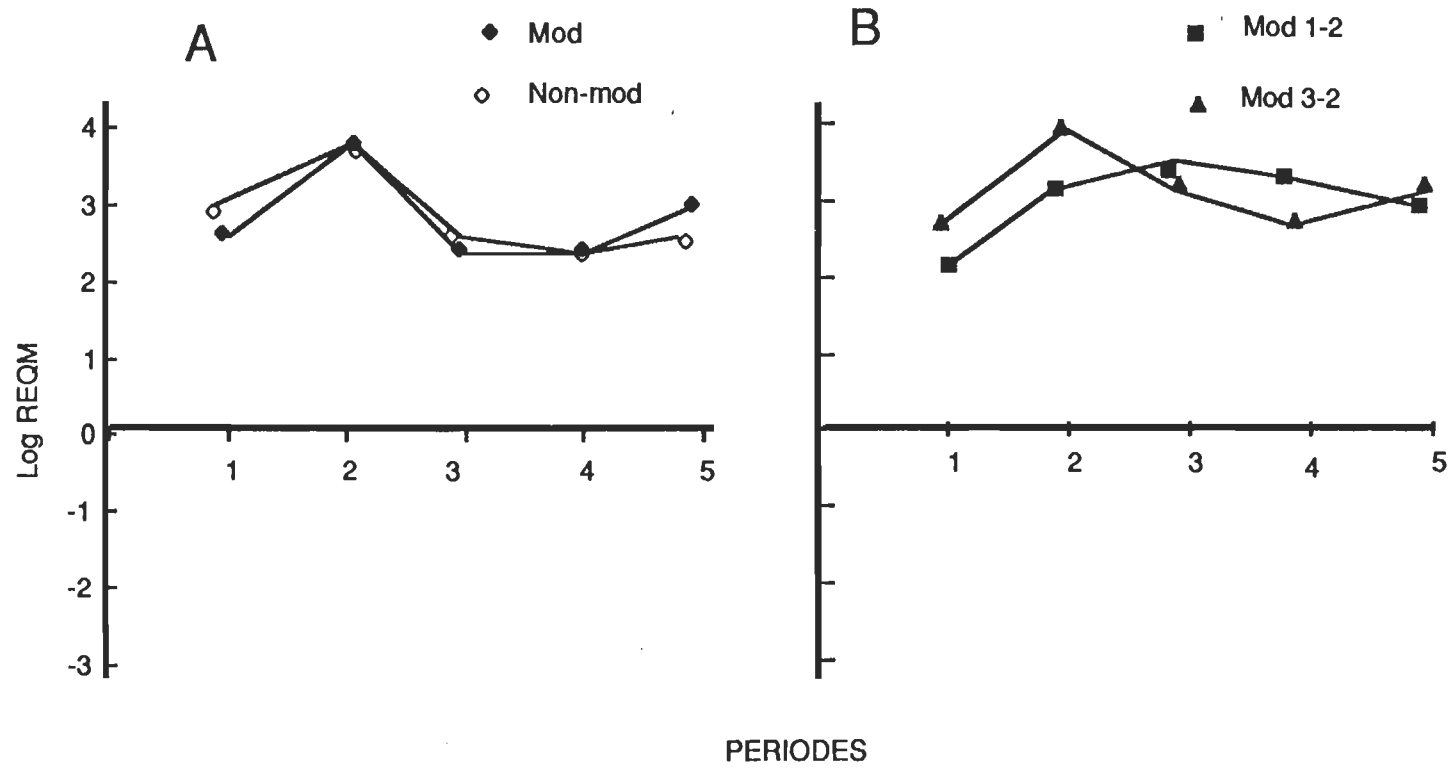


Figure 18. Log REQM de l'activité agoniste en fonction de l'atteinte de la cible 2 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (18a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (18b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 2 après la planification de la cible 1 (Mod 1-2) et après la planification de la cible 3 (Mod 3-2).

tracés des REQM résultant des essais avec modification ne se comportent pas de la même façon. D'abord au niveau 1-2, le REQM agoniste ne cesse de croître jusqu'à la période 3 indiquant un besoin accru d'activité agoniste telle qu'on s'y attend pour poursuivre le mouvement plus loin que prévu initialement. Au niveau 3-2, la chute la plus importante du REQM agoniste se produit à la période 4, c'est-à-dire retardé par rapport au mouvement planifié en fonction de la cible 2. Aussi la période 3 de ce niveau de cible témoigne d'un agoniste élevé indiquant sa grande contribution tel que le prévoit la planification d'une cible éloignée. Le tableau 11 (Annexe A) présente les valeurs des REQM agonistes pour la cible 2.

### Cible\_3

En ce qui concerne les essais où la cible 3 est atteinte, des différences significatives ont été trouvées au niveau des conditions,  $F(3,18) = 14.66$ ,  $p < .01$  et de l'interaction conditions \* périodes,  $F(12,72) = 3.33$ ,  $p < .01$ . La variable 'périodes' a tout juste raté le seuil de signification. Le test Tukey A a localisé les différences à la période 3 entre le niveau NON-MOD et les niveaux 2-3,  $Q(4,90) = 5.77$ ,  $p < .01$  et 1-3,  $Q(4,90) = 7.96$ ,  $p < .01$ , et aussi entre les niveaux 3-3 et 1-3,  $Q(4,90) = 5.22$ ,  $p < .01$ . A la période 4, les différences se situent entre le niveau NON-MOD et les niveaux 2-3,  $Q(4,90) = 4.8$ ,  $p < .01$  et 1-3,

$$Q(4,90) = 6.11, p < .01.$$

Sur la figure 19a, on remarque que les tracés des REQM agonistes ont sensiblement le même patron. Le niveau 3-3 se caractérise par un agoniste qui demeure supérieur. Sur la figure 19b, les niveaux de cible 1-3 et 2-3 présentent des tracés ayant un patron général semblable puisque dans les deux cas, il s'agit de poursuivre le mouvement plus loin que prévu. On remarque que les niveaux 1-3 et 2-3 obligent une augmentation de l'agoniste à la période 3, et ce jusqu'à la période 4, contrairement à ce qu'on observe sur la figure 19a. Ce phénomène caractérise un agoniste prévu pour une cible rapprochée et qui doit s'adapter à une modification en faveur d'une cible éloignée, c'est-à-dire une activité agoniste qui doit se poursuivre plus longtemps (niveaux 1-3 et 2-3). Le tableau 11 (Annexe A) donne les valeurs des REQM agonistes pour les mouvements à la cible 3.

En résumé, la progression de l'activité agoniste se fait selon la planification de la cible initiale. En général, en absence de modification, les mouvements sont caractérisés par une augmentation de l'agoniste à la période 2 spécifiant l'accélération et par une diminution à la période 3 soit au moment de l'augmentation de l'antagoniste. Lorsqu'un long mouvement est planifié et modifié pour un plus court (niveau 3-1, 2-1 et 3-2), on remarque à la période 3 l'importance accrue de l'agoniste alors que sa plus grande diminution passe de la période 3 à la période 4. La planification d'une cible éloignée prévoit donc que

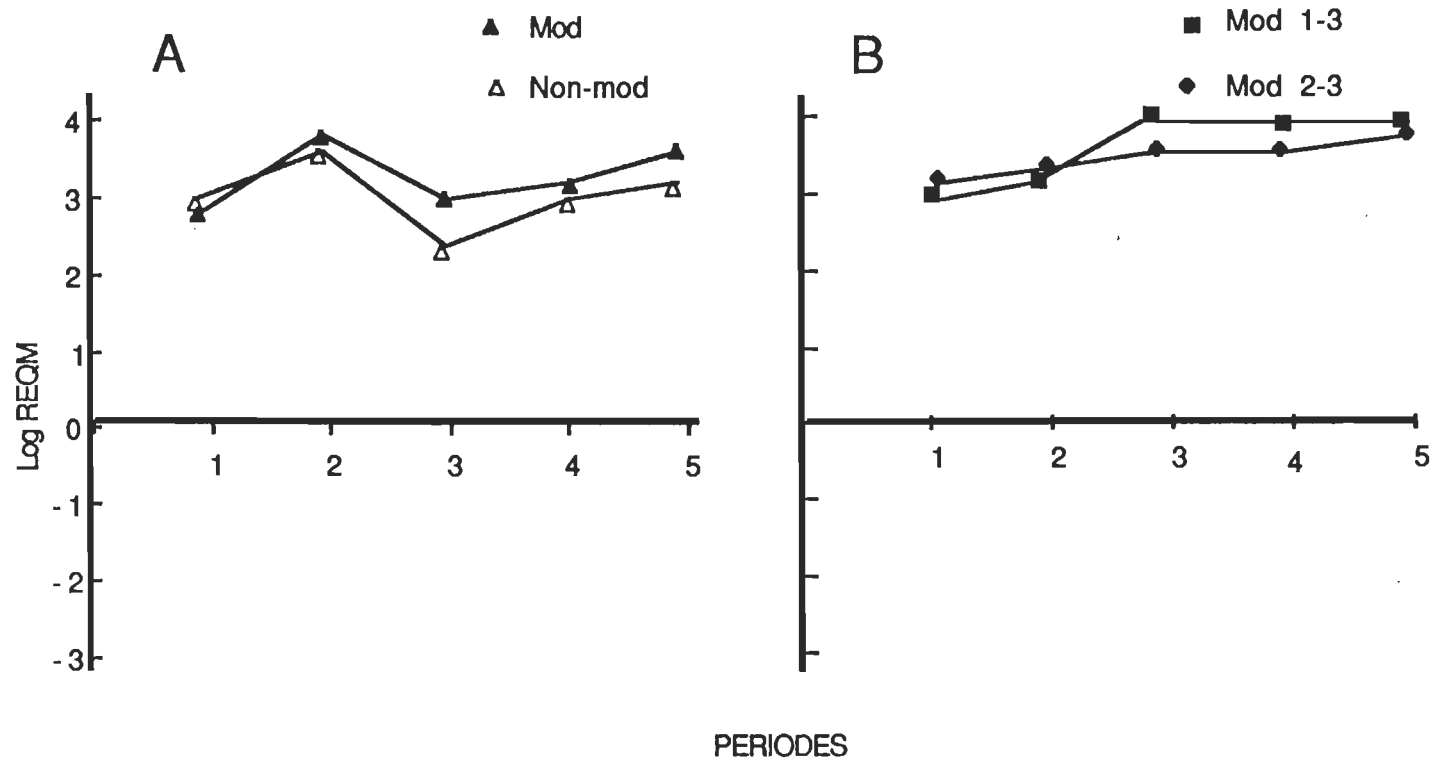


Figure 19. Log REQM de l'activité agoniste en fonction de l'atteinte de la cible 3 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (19a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (19b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 3 après la planification de la cible 1 (Mod 1-3) et après la planification de la cible 2 (Mod 2-3).

l'agoniste sera actif plus longtemps. En contre-partie, les mouvements planifiés pour une cible rapprochée et modifiés pour une cible éloignée (niveaux 1-2, 1-3 et 2-3) nécessitent une adaptation de l'agoniste pour allonger le mouvement. Cela se traduit par une augmentation d'activité à partir de la période 2 avec une stabilisation ou une légère baisse vers la période 5.

#### REQM des activités EMG antagonistes

Nous examinerons maintenant la progression de l'activité du muscle antagoniste durant l'exécution du mouvement. Comme le REQM agoniste, le REQM antagoniste est transformé logarithmiquement et indique l'importance relative de l'activité antagoniste pour la durée sur laquelle son calcul est basé. Les tracés qui suivront sont aussi divisés en cinq périodes et les REQM calculés sur chacun d'eux.

Avant d'aborder les cibles particulières, jetons un coup d'oeil sur la figure 20 qui nous propose les tracés des REQM antagonistes tirés des essais sans modification en condition MOD (figure 20a) et en condition NON-MOD (figure 20b).

Les tracés sont caractérisés par un haut niveau d'activité antagoniste aux périodes 3 et 4, indiquant que c'est à ces périodes que le phénomène de freinage prend place davantage. Il faut aussi noter qu'à la période 2 des

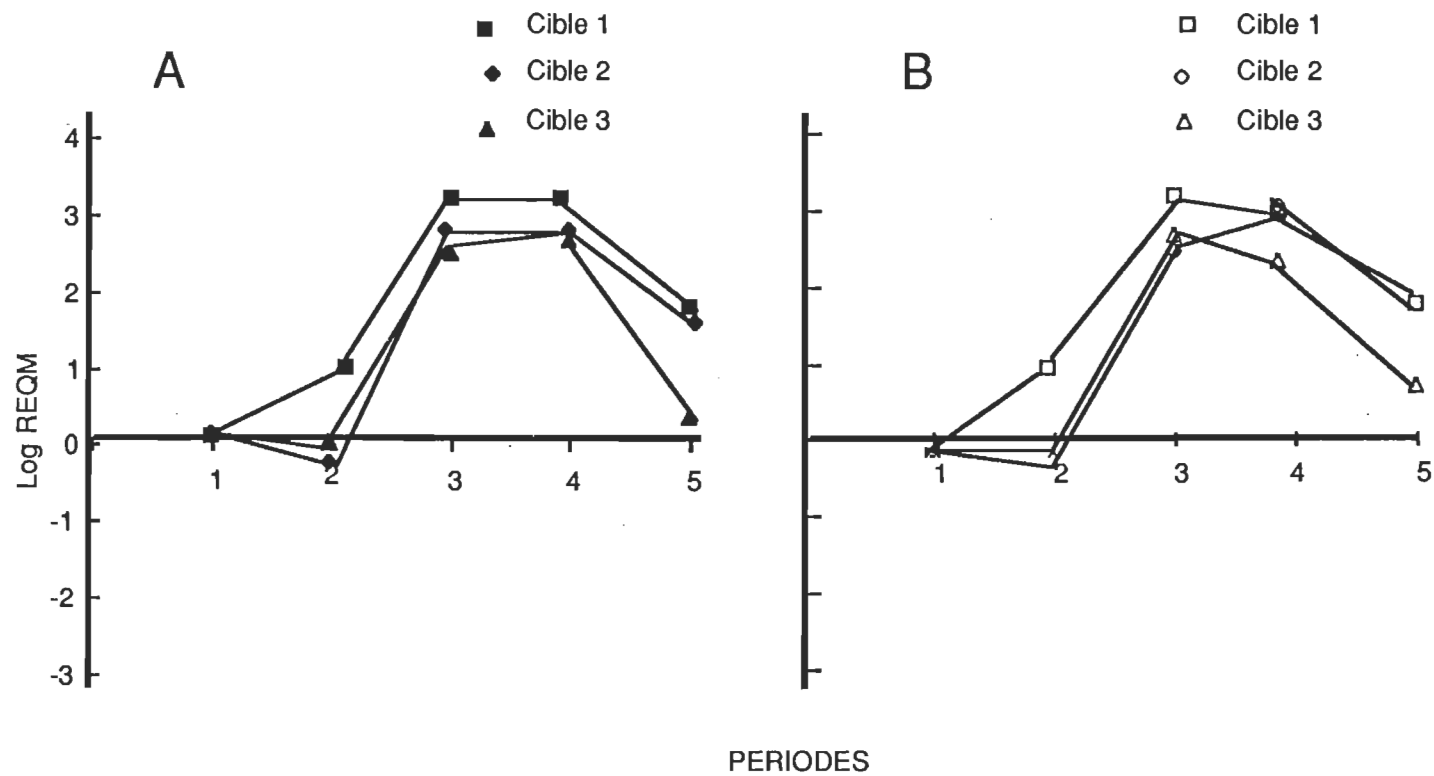


Figure 20. Log REQM de l'activité antagoniste en absence de modification, en fonction de chacune des 3 cibles selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (20a) résume les conditions de cible modifiable (Mod). La partie droite (20b) illustre les conditions témoins de cible non modifiable (Non mod).



niveaux 1-1 et NON-MOD à la cible 1, l'antagoniste est relativement plus fort qu'aux autres périodes laissant voir une activité précoce en raison d'un arrêt prévu tôt, ce qui n'est pas le cas lorsque la cible 2 ou 3 est planifiée. Pour les autres périodes, les tracés suivent un patron similaire, que ce soit en condition MOD ou NON-MOD.

### Cible 1

L'analyse de variance a révélé que seule la variable 'périodes' s'est avérée significative,  $F(4,24) = 39.13$ ,  $p < .01$ . Sur la figure 21a, on s'aperçoit que les tracés REQM antagonistes sont presque parfaitement superposables. C'est à la période 3 que le REQM antagoniste atteint son maximum qui est maintenu jusqu'à la période 4. Lorsque le mouvement est planifié en fonction d'une cible éloignée (figure 21b), on constate que les tracés épousent le même patron à la différence que le REQM antagoniste atteint son maximum cette fois-ci à la période 4, ce qui constitue un retard tel que prévu par la planification d'une cible éloignée. Le tableau 12 (Annexe A) donne les résultats moyens des REQM antagonistes pour les essais effectués à la cible 1.

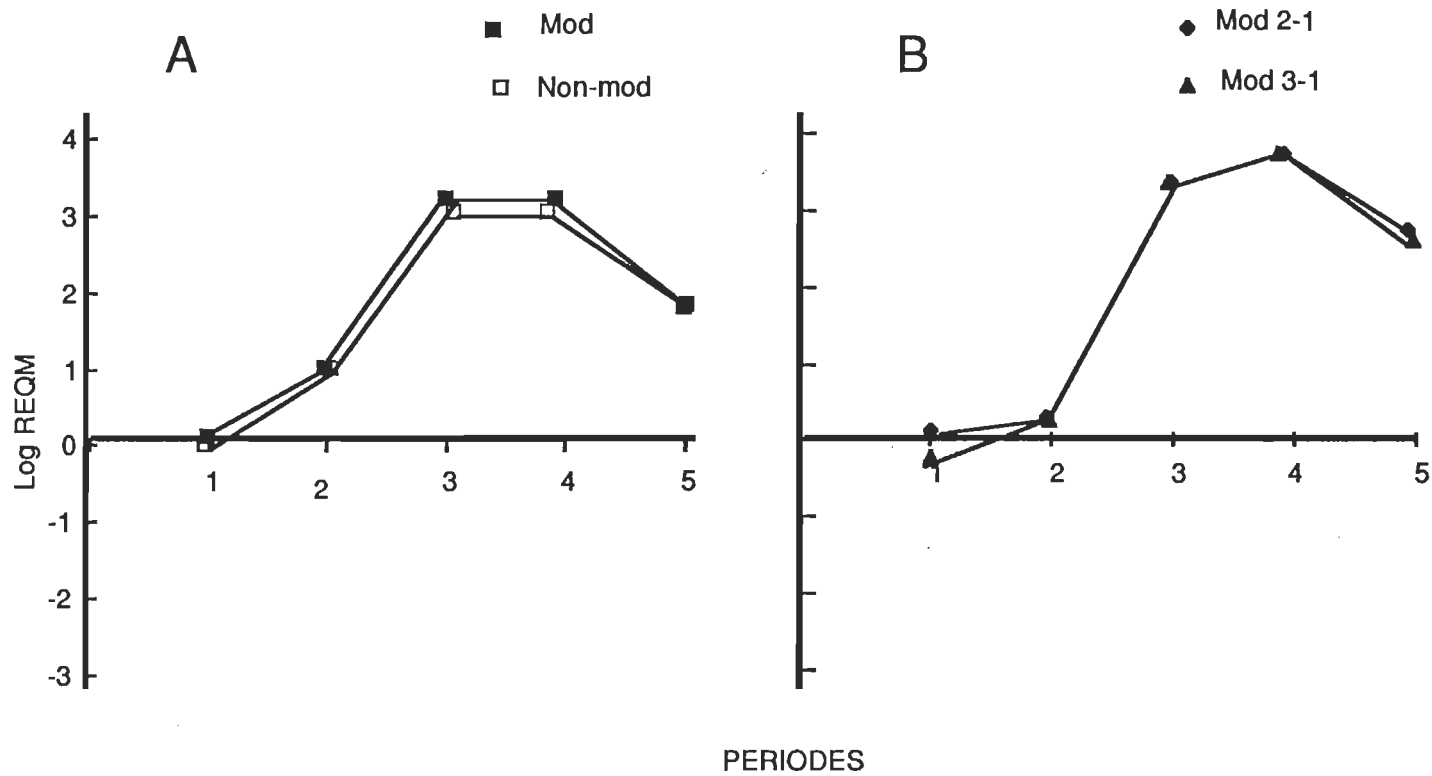


Figure 21. Log REQM de l'activité antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 1 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (21a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (21b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 1 après la planification de la cible 2 (Mod 2-1) et après la planification de la cible 3 (Mod 3-1).

## Cible\_2

L'analyse de variance a déterminé des différences significatives au niveau des conditions (MOD et NON-MOD),  $F(3,18) = 3.37$ ,  $p < .05$ , de la variable 'périodes',  $F(4,24) = 32.81$ ,  $p < .01$  et de l'interaction conditions \* périodes,  $F(12,72) = 2.62$ ,  $p < .01$ . Le test à posteriori Tukey A a permis de situer les différences pour la période 2 seulement entre le niveau 1-2 et les niveaux 2-2,  $Q(4,90) = 6.97$ ,  $p < .01$ , NON-MOD,  $Q(4,90) = 6.81$ ,  $p < .01$  et 3-2,  $Q(4,90) = 6.11$ ,  $p < .01$ .

La figure 22a illustre les tracés des essais non modifiés à la cible 2. On remarque qu'ils sont superposables. Sur la figure 22b, on aperçoit des tracés différents selon le niveau de cible. Au niveau 1-2, le REQM antagoniste augmente constamment jusqu'à la période 3 où il atteint son maximum. La planification de la cible rapprochée entraîne donc la venue plus hâtive de l'activité antagoniste malgré le fait que le mouvement doive se terminer à une cible éloignée. C'est pourquoi la période 2 du niveau 1-2 se montre significativement différente des niveaux 2-2, 3-2 et NON-MOD. On voit au contraire que le niveau 3-2 produit d'abord une chute du REQM antagoniste à la période 2 pour ensuite le voir augmenter et atteindre son maximum à la période 4, soit plus tardivement tel qu'on s'y attend après avoir planifié une cible plus éloignée. Le tableau 12 (Annexe A) reproduit les REQM antagonistes observés pour les

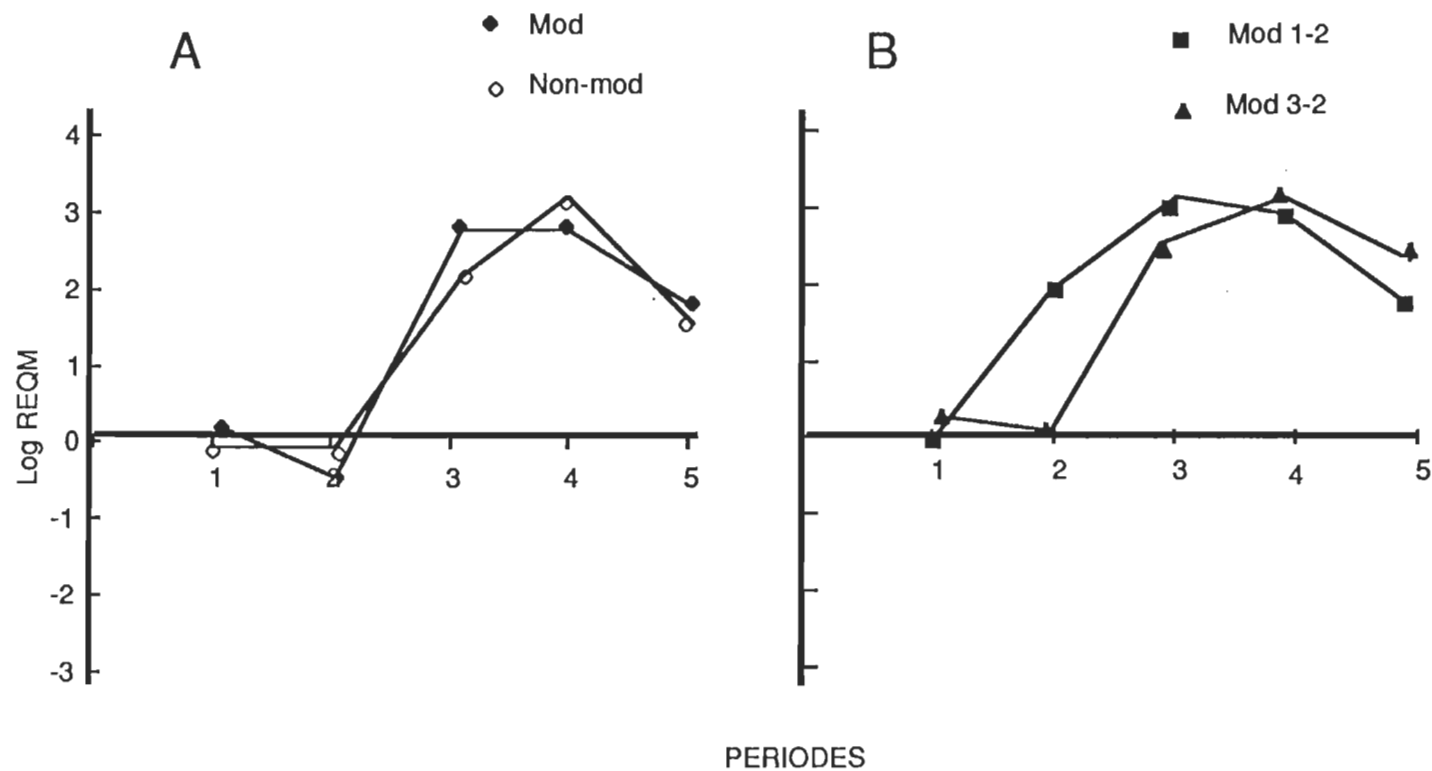


Figure 22. Log REQM de l'activité antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 2 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (22a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (22b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 2 après la planification de la cible 1 (Mod 1-2) et après la planification de la cible 3 (Mod 3-2).

mouvements vers la cible 2.

### Cible 3

Des différences significatives sont enregistrées au niveau des conditions,  $F(3,18) = 18.24$ ,  $p < .01$ , de la variable 'périodes',  $F(4,24) = 22.74$ ,  $p < .01$  et de l'interaction conditions \* périodes,  $F(12,72) = 2.89$ ,  $p < .01$ . Le test Tukey A a localisé les différences à la période 2 entre le niveau NON-MOD et les niveaux 1-3,  $Q(4,90) = 7.77$ ,  $p < .01$  et 2-3,  $Q(4,90) = 5.3$ ,  $p < .01$ . A la période 4, les différences sont déterminées entre le niveau 3-3 et les niveaux 1-3,  $Q(4,90) = 7.61$ ,  $p < .01$  et 2-3,  $Q(4,90) = 5.11$ ,  $p < .01$ .

Sur la figure 23a, les tracés des essais non modifiés à la cible 3 suivent un patron similaire. On peut y constater que c'est aux périodes 3 et 4 que le REQM antagoniste présente son maximum. La figure 23b montre aussi des tracés similaires entre eux. Sur cette figure, il s'agit de mouvements qui doivent se terminer plus loin que prévu. On remarque aux niveaux 1-3 et 2-3, que l'antagoniste est important plus tôt dans le mouvement, soit à la période 2 tel qu'observé lorsque la cible planifiée est rapprochée et contrairement à ce qu'on note en cas de planification de la cible la plus éloignée (figure 23a). Par ailleurs, pour la période 4, on remarque le niveau 3-3 engendre un antagoniste plus grand par rapport à ce qui est observé lorsque la cible

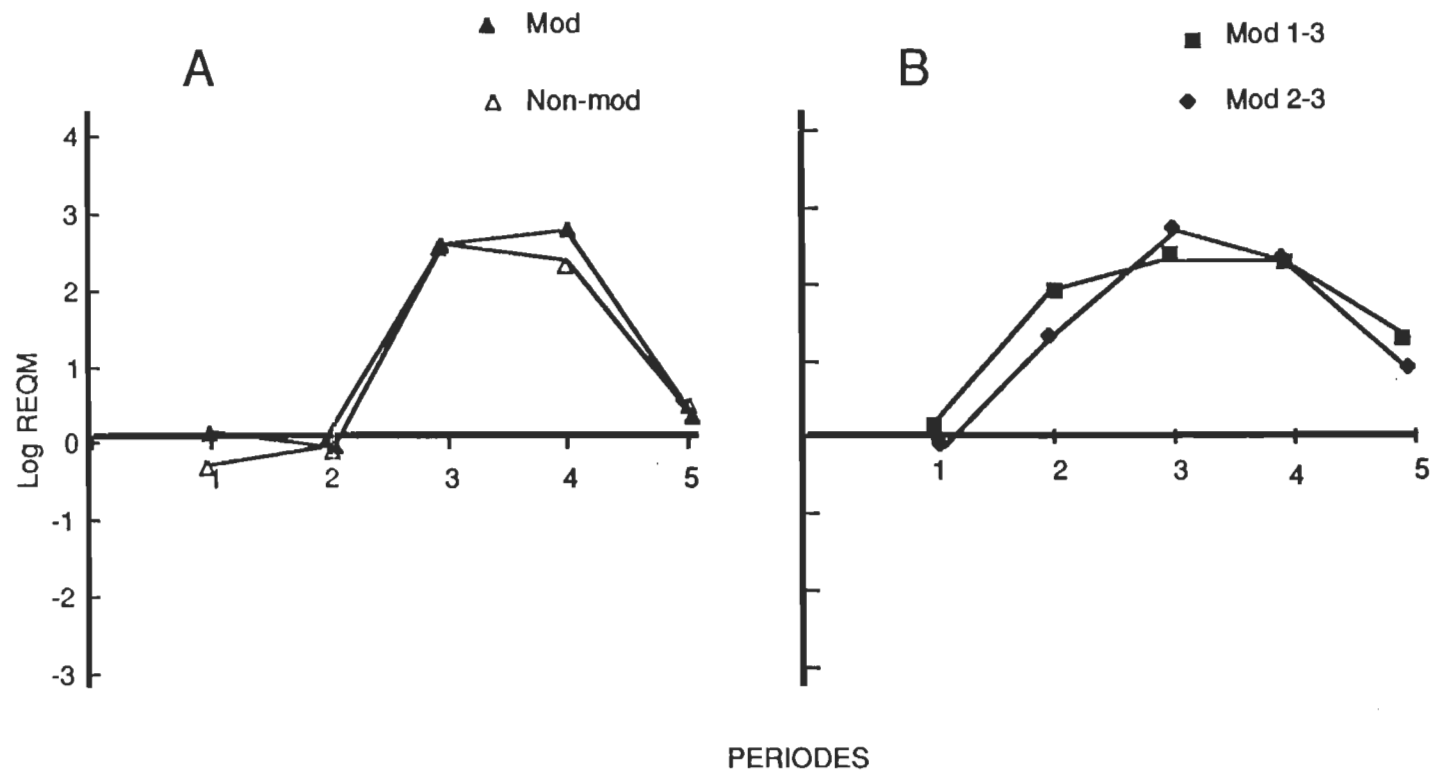


Figure 23. Log REQM de l'activité antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 3 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (23a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (23b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 3 après la planification de la cible 1 (Mod 1-3) et après la planification de la cible 2 (Mod 2-3).

planifiée est plus rapprochée (niveaux 1-3 et 2-3). De plus, c'est lorsque la cible 3 est la cible effective qu'on observe les plus bas REQM antagonistes, indépendamment de la cible initialement préparée. Le tableau 12 (Annexe A) donne les résultats moyens des REQM antagonistes pour les essais se terminant à la cible 3.

En résumé, l'antagoniste semble dépendre de la planification de la cible. Pour les mouvements planifiés en fonction d'une cible rapprochée (niveaux 1-1, 1-2, 1-3, NON-MOD (à la cible 1) et 2-3), il se manifeste tôt dans le mouvement. Ainsi, on remarque une augmentation de l'antagoniste dès la période 2. Le maximum est atteint à la période 3 malgré une modification amenant le mouvement à s'allonger (niveaux 1-2 et 1-3). Par ailleurs, lors de la planification d'une cible éloignée, l'antagoniste se montre plus silencieux à la période 2. De plus, la planification d'une cible éloignée puis modifiée en faveur d'une plus rapprochée (niveaux 2-1 et 3-1) fait passer le maximum de l'antagoniste de la période 3 à la période 4. Cela illustre que plus la cible planifiée est éloignée plus le freinage est retardé alors que réciproquement, plus la cible planifiée est rapprochée, plus le freinage est précoce.

L'examen des REQM agonistes et antagonistes selon les cinq périodes du mouvement nous permet de distinguer deux phases typiques de l'exécution. Les périodes 1 et 2 et parfois 3 pour les longs mouvements concernent l'importance de l'activité agoniste et sont liés à la phase de

l'accélération du mouvement. Les périodes 3, 4 et 5 pour les courts mouvements et 4 et 5 pour les longs, concernent l'activité antagoniste et reflètent la phase de la décélération jusqu'à l'atteinte de la cible.

#### Ratio d'activité EMG agoniste/antagoniste

Le rôle de cette variable est de distinguer les rapports entre l'activité agoniste et antagoniste selon les cinq périodes arbitrairement définies et qui varient selon la progression du mouvement. Du point de vue du modèle masse-ressort il est intéressant de connaître à quelle phase du mouvement les activités EMG agoniste et antagoniste montrent un équilibre entre elles.

Comme les ratios sont obtenus par la différence des logarithmes naturels des REQM de l'activité agoniste et antagoniste, on comprendra qu'une valeur positive indique un agoniste supérieur à l'antagoniste alors qu'une valeur négative signifie plus d'activité antagoniste qu'agoniste. Il faut garder en mémoire qu'un ratio près de '0' ne signifie pas qu'il n'y a pas d'activité mais plutôt que les surfaces sous la courbe, soit les valeurs des REQM agoniste et antagoniste, sont égales ou presque.

Sur la figure 24, on retrouve les tracés des ratios agoniste/antagoniste concernant les essais sans modification. La figure 24a, nous montre les résultats tirés de la condition MOD tandis que la figure 24b montre ceux



obtenus en condition NON-MOD.

On remarque sur la figure 24a, que la période 1 présente des ratios d'activité élevés et équivalents pour les trois niveaux de cible. A la période 2, une chute du ratio se produit en ce qui concerne le niveau 1-1 alors que pour les autres niveaux de cible, ils augmentent. Aux périodes 3 et 4, les ratios diminuent sous le seuil '0' signifiant davantage de travail antagoniste sauf pour le niveau de cible 3-3 où, malgré la chute du ratio, l'agoniste demeure dominant. A la période 5, les ratios s'équilibrent pour la cible 1 seulement et augmentent en fonction de l'éloignement de la cible effective pour les cibles 2 et 3.

La figure 24b fait voir à la période 1, des ratios égaux entre les niveaux de cible. Encore une fois, on enregistre à la période 2 une chute du ratio pour le niveau de cible 1-1 alors qu'ils augmentent pour les deux autres niveaux de cibles. A la période 3, le ratio à la cible 1 indique une dominance de l'antagoniste. Aux cibles 2 et 3, les activités agoniste et antagoniste s'équilibrent. La période 4 voit les ratios de la cible 1 et 3 augmentés et celui de la cible 2 retombé. Dans le cas des cibles 1 et 2, la dominance antagoniste persiste ce qui ne se produit pas à la cible 3. A la période 5, les ratios s'équilibrent pour la cible 1 seulement et augmentent en fonction de l'éloignement de la cible effective pour les cibles 2 et 3.

L'examen des ratios agoniste/antagoniste permet de préciser l'histoire du mouvement. La première partie du

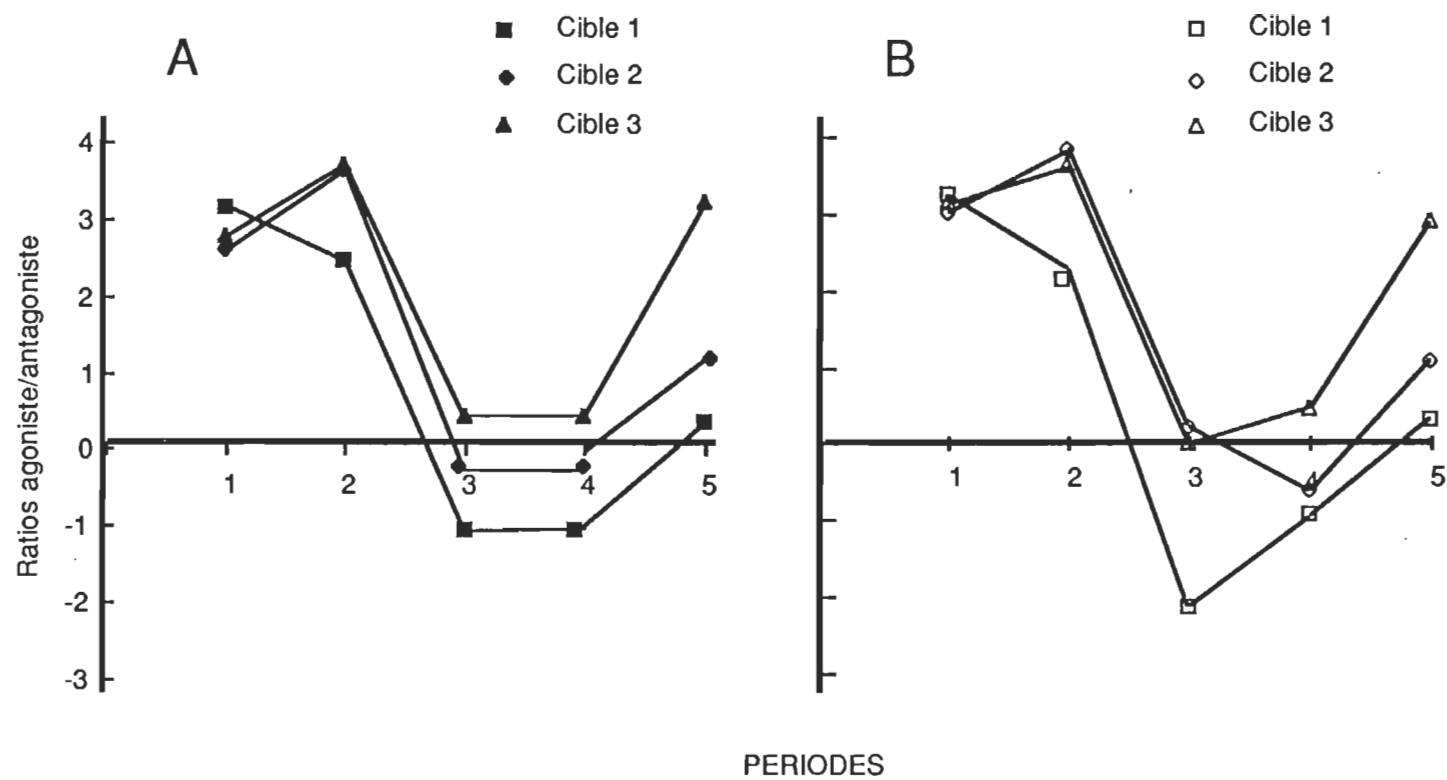


Figure 24. Ratios des REQM (en log) agoniste/antagoniste en absence de modification, en fonction de chacune des 3 cibles selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (24a) résume les conditions témoins de cible modifiable (Mod). La partie droite (24b) illustre les conditions témoins de cible non modifiable (Non-mod).

mouvement indique une prédominance de l'agoniste. Ainsi, le ratio s'accroît à la période 2 pour les cibles éloignées seulement et chute pour un mouvement plus court. Cette chute du ratio peut s'expliquer par le fait qu'un mouvement court nécessite une moins grande accélération qu'un long mouvement donc moins d'activité agoniste. Cela appuie l'observation à l'effet que la vitesse est moins grande pour les mouvements courts. En outre, c'est pour ces types de mouvement que l'antagoniste se manifeste le plus tôt. Ces deux facteurs contribuent à maintenir le ratio agoniste/antagoniste plus bas durant la période 2. Pour les périodes 3 et 4, l'antagoniste est généralement dominant sinon à peu près égal à l'agoniste. A la période 5, c'est-à-dire à la fin du mouvement, l'agoniste domine l'antagoniste sauf pour les mouvements dont la cible effective est rapprochée. Par ailleurs, la grandeur du ratio semble être fonction de l'éloignement de la cible atteinte.

Jetons maintenant un coup d'oeil sur les modifications des ratios agoniste/antagoniste selon les cibles effectives pour les conditions MOD et NON-MOD.

#### Cible\_1

Sur la figure 25, nous remarquons les tracés de ratios agoniste/antagoniste obtenus des mouvements exécutés vers la cible 1. L'analyse de variance n'a pas révélé de différences significatives au niveau des conditions MOD et NON-MOD.

Cependant, des différences significatives ont été décelées entre les périodes  $F(4,24) = 26.39$ ,  $p < .01$ , ainsi qu'un effet interactif conditions \* périodes,  $F(12,72) = 1.93$ ,  $p < .05$ . Afin de localiser ces différences, le test à posteriori Tukey A fut effectué. Ce test nous apprend que les différences se situent à la période 2 entre les niveaux NON-MOD et 3-1,  $Q(4,90) = 3.91$ ,  $p < .05$  et à la période 3 entre le niveau NON-MOD et les niveaux 2-1,  $Q(4,90) = 4.56$ ,  $p < .01$  et 3-1,  $Q(4,90) = 5.28$ ,  $p < .01$ .

Sur la figure 25a, les tracés des mouvements non modifiés à la cible 1 se superposent presque parfaitement sauf à la période 3 du tracé NON-MOD où on enregistre le ratio le plus bas signifiant que dans ce cas, le travail de l'antagoniste était supérieur à tout autre moment. Le ratio passe de -1.06 au niveau de la cible 1-1 à -2.12 au niveau NON-MOD. On réalise donc que l'antagoniste est plus franchement présent lorsque le sujet sait qu'il n'aura pas de modification de cible à affronter. La figure 25b nous présente les tracés des ratios obtenus pour les mouvements effectivement modifiés. Les tracés se surperposent parfaitement indiquant un même comportement du ratio agoniste/antagoniste au niveau de cible 2-1 et 3-1. La particularité à noter ici est la période où se situe le travail antagoniste le plus important. Alors qu'on observe que, pour les mouvements non modifiés préparés en fonction de la cible 1, l'antagoniste est le plus important à la période 3, on constate que la planification de cibles

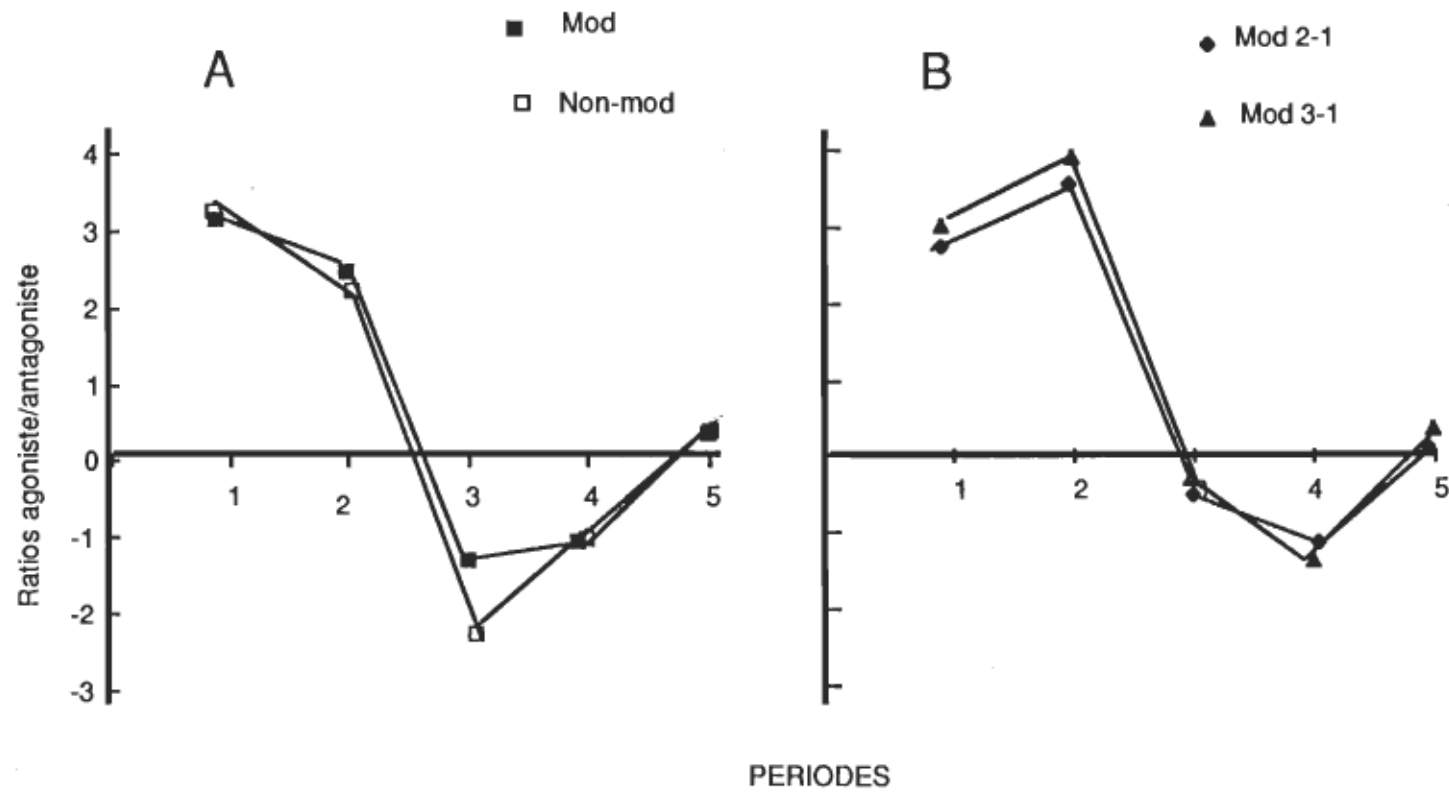


Figure 25. Ratios des REQM (en log) agoniste/antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 1 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (25a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (25b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 1 après la planification de la cible 2 (Mod 2-1) et après la planification de la cible 3 (Mod 3-1).

éloignées occasionne un déplacement de la période 3 vers la période 4, donc plus tard en raison du fait que lorsqu'on vise une cible éloignée. L'antagoniste est planifié plus tardif et ce même si la cible 1 sera finalement atteinte et que le sujet en est avisé dès le début du mouvement. On remarque aussi un ratio d'activité plus grand à la période 2 lorsqu'une cible éloignée est planifiée, ceci en accord avec l'accélération que nécessite l'atteinte des cibles éloignées. Le tableau 13 (Annexe A) donne les résultats des ratios obtenus à chacune des 12 combinaisons de cibles.

### Cible\_2

Les résultats entre les conditions MOD et NON-MOD sont statistiquement identiques. Cependant, on enregistre des différences significatives entre les périodes  $F(4,24) = 12.9$ ,  $p < .01$  et un effet d'interaction conditions \* périodes  $F(12,72) = 3.59$ ,  $p < .01$ . Le test à posteriori Tukey A situe les différences à la période 2 entre le niveau 1-2 et les niveaux 2-2,  $Q(4,90) = 5.85$ ,  $p < .01$ , 3-2,  $Q(4,90) = 5.96$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,90) = 6.38$ ,  $p < .01$ . Sur la figure 26a, les tracés des ratios obtenus aux essais non modifiés à la cible 2, nous indiquent qu'en condition NON-MOD, le rapport illustrant le travail dominant de l'antagoniste se trouve à la période 4. En condition MOD, le rapport le plus bas se produit à la période 3 et dure jusqu'à la période 4. C'est donc dire que tant qu'une

modification demeure possible, les sujets ont tendance à amorcer l'activité antagoniste plus tôt en la maintenant plus longtemps. On s'aperçoit, en ce qui concerne les autres périodes que les tracés suivent le même patron.

Aux niveaux 1-2 et 3-2, on constate sur la figure 26b que les tracés ont un aspect différent. Le tracé du niveau 1-2 se distingue par un ratio décroissant à partir de la période 1. C'est la caractéristique d'un mouvement préparé en fonction de la cible 1, alors que les mouvements préparés pour une cible plus éloignée ne montrent pas une telle tendance qu'il y ait une modification de cible ou non.

Lorsque le mouvement est planifié en fonction d'une cible plus éloignée (niveaux 2-2, 3-2 ou NON-MOD), on remarque une augmentation du ratio à la période 2 (besoin d'accélération plus grand) alors que l'antagoniste se montre dominant à la période 4, tel qu'on s'y attend en vertu de la planification d'une cible éloignée. A la période 5, et ce dans tous les cas (figure 26), les ratios observés sont supérieurs à 0 et n'indiquent pas d'équilibre agoniste/antagoniste. Le tableau 13 (Annexe A) présente les valeurs des ratios agoniste/antagoniste pour les mouvements se terminant à la cible 2.

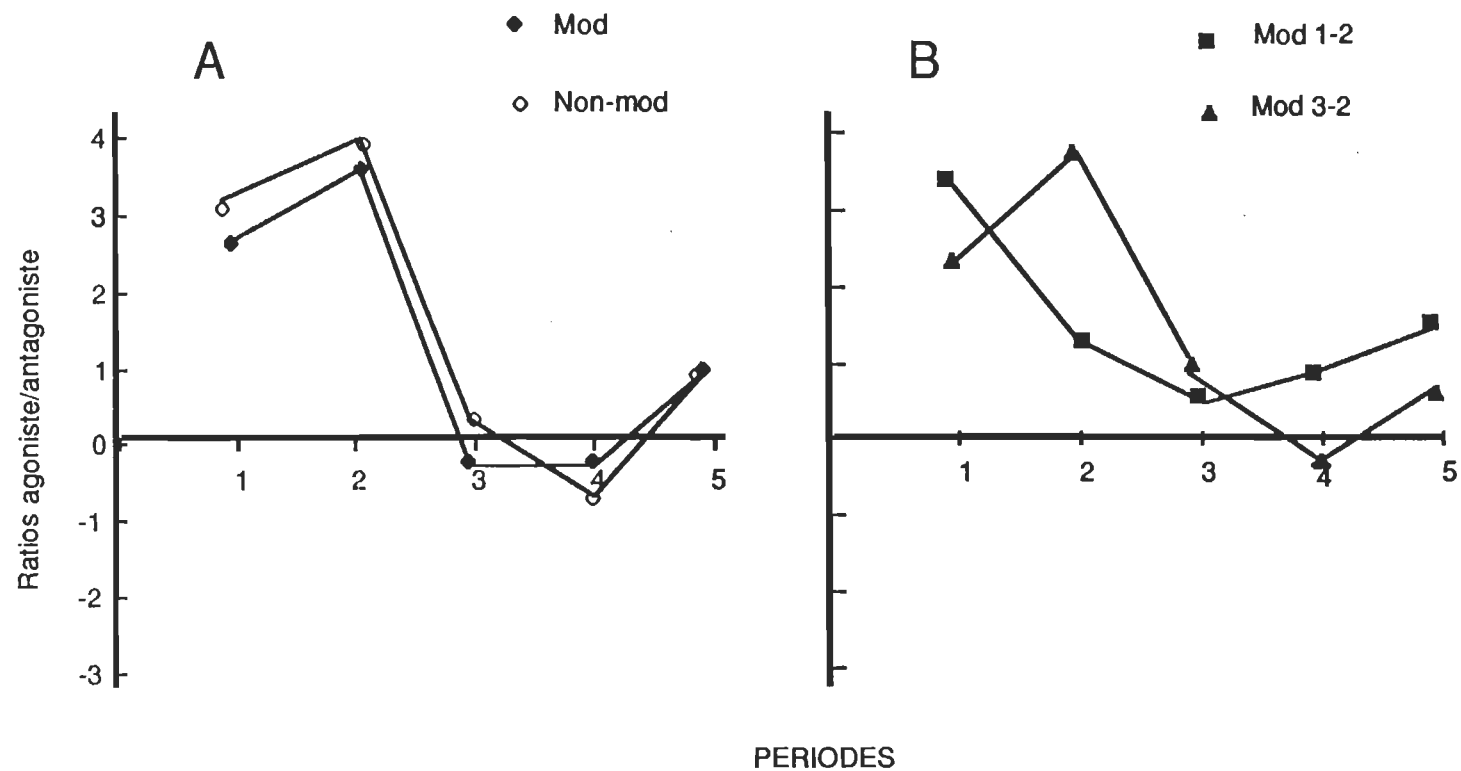


Figure 26. Ratios des REQM (en log) agoniste/antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 2 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (26a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (26b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 2 après la planification de la cible 1 (Mod 1-2) et après la planification de la cible 3 (Mod 3-2).



### Cible\_3

En ce qui concerne la cible 3, aucune différence significative ne fut détectée au niveau des conditions. On retrouve néanmoins des différences significatives entre les périodes  $F(4,24) = 11.26$ ,  $p < .01$  et un effet d'interaction conditions \* périodes  $F(12,72) = 4.1$ ,  $p < .01$ . Le test Tukey A localise les différences à la période 2 entre le niveau 1-3 et les niveaux 3-3,  $Q(4,90) = 7.2$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,90) = 6.93$ ,  $p < .01$  et aussi entre le niveau 2-3 et les niveaux 3-3,  $Q(4,90) = 5.18$ ,  $p < .01$  et NON-MOD,  $Q(4,90) = 4.92$ ,  $p < .01$ .

Sur la figure 27a, les tracés des essais non modifiés se superposent presque parfaitement. On distingue un ratio élevé à la période 2 indiquant une grande contribution de l'agoniste tel qu'on s'y attend lorsque la cible 3 est planifiée. En revanche, la figure 27b nous apprend qu'aux niveaux 1-3 et 2-3, le ratio tombe à la période 2 tel qu'on s'y attend lorsqu'une cible plus rapprochée est planifiée et que le mouvement doit s'allonger en faveur d'une cible plus éloignée.

En aucun temps l'antagoniste ne domine dans ces types de mouvement. Au niveau 1-3, les ratios des périodes 2, 3 et 4 sont bas et équivalents, indiquant une contribution de l'antagoniste pour freiner le mouvement tôt puisque c'est la cible 1 qui est planifiée. Toutefois, les ratios demeurent supérieurs à '0' et signalent une plus grande activité

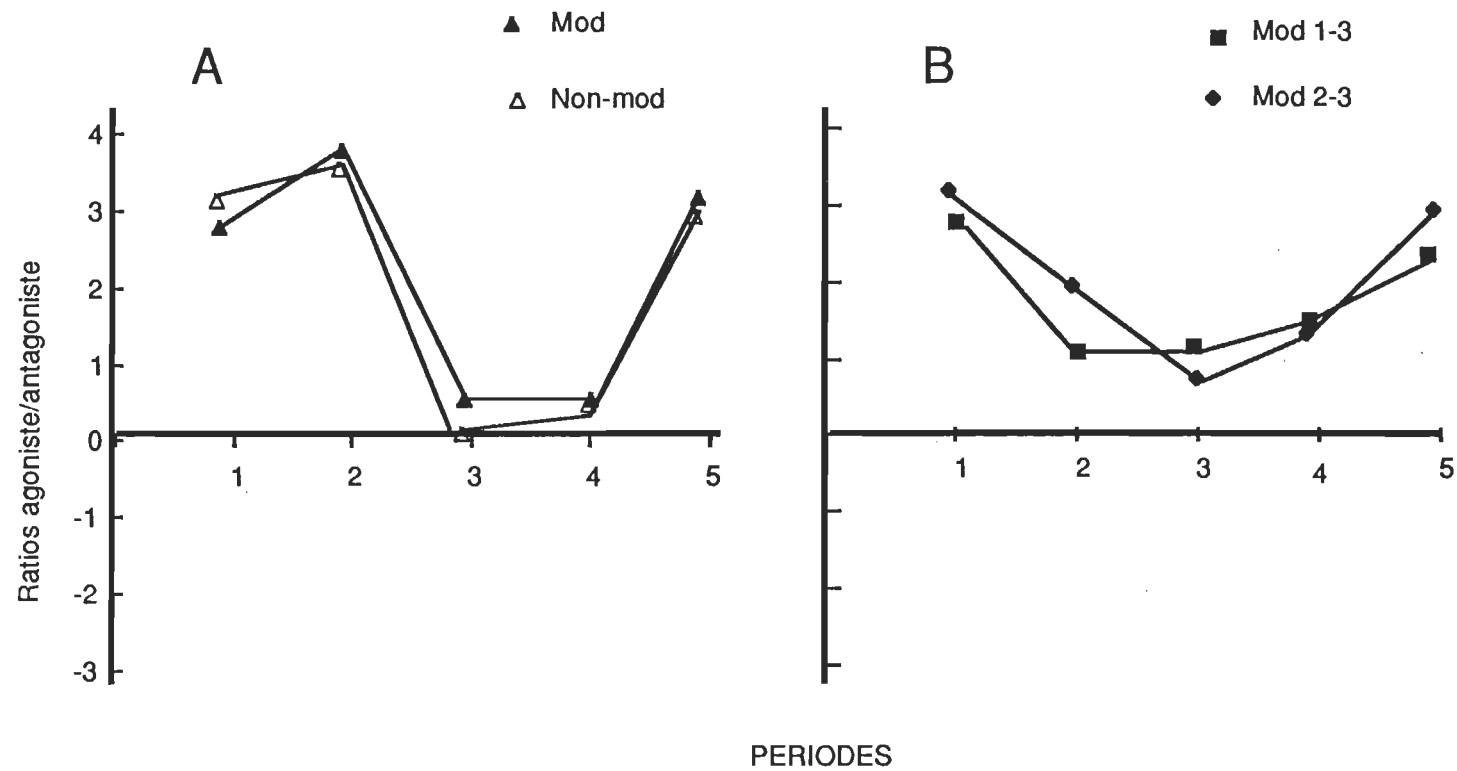


Figure 27. Ratios des REQM (en log) agoniste/antagoniste en fonction de l'atteinte de la cible 3 selon les 5 périodes du mouvement. La partie gauche (27a) résume les conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (27b) illustre les résultats pour l'atteinte de la cible 3 après la planification de la cible 1 (Mod 1-3) et après la planification de la cible 2 (Mod 2-3).

agoniste puisqu'il faut se rendre à la cible 3. Le même scénario se déroule au niveau 2-3 à l'exception de la période 3 où on enregistre le plus bas ratio agoniste/antagoniste. A la période 5, et ce dans tous les cas (figure 27), les ratios observés sont franchement supérieurs à '0' et n'indiquent pas d'équilibre agoniste/antagoniste. Le tableau 13 (Annexe A) rapporte les valeurs des ratios observés pour les mouvements se terminant à la cible 3.

En résumé, on remarque que les mouvements planifiés sur la base d'une cible éloignée mais dont la cible effective est rapprochée entraînent un ratio en faveur de l'agoniste à la période 2 et d'autre part la période dans laquelle l'antagoniste domine est retardé de la période 3 à la période 4. La planification d'une cible éloignée produit donc une accélération plus grande (plus d'agoniste à la période 2) et un freinage plus tardif (antagoniste à la période 4). A l'inverse, lorsqu'une cible rapprochée est planifiée, le ratio chute à la période 2 indiquant une contribution moins grande de l'agoniste. De plus, aux périodes 3 et 4, les ratios demeurent élevés en faveur de l'agoniste lorsqu'une cible éloignée doit être atteinte, indiquant dans ce cas un besoin accru d'activité pour prolonger le mouvement à la nouvelle cible. Même si pour ces périodes l'antagoniste est présent, l'agoniste lui est supérieur. A la période 5, les ratios marquent un équilibre relatif entre l'agoniste et l'antagoniste pour la cible effective la plus rapprochée seulement.

### Durée de la bouffée initiale de l'agoniste

Cette variable décrit le temps consacré à la première activité du muscle agoniste (BA), c'est-à-dire la bouffée initiatrice du mouvement. La première bouffée agoniste est modulée en fonction de la cible planifiée et couvre une partie de la période pré-déplacement et une partie de la période déplacement. Bien qu'aucune différence ne fut détectée au seuil de signification  $p < .01$ , il est cependant intéressant de constater la tendance de ces résultats.

On remarque sur la figure 28a que l'augmentation de la durée de la bouffée initiale est fonction de l'éloignement de la cible planifiée. Pour la condition NON-MOD, cette fonction apparaît linéaire alors que cette linéarité est brisée lorsque la cible est susceptible d'être modifiée (MOD). Sur la figure 28b, on peut constater deux phénomènes. D'une part, tel qu'attendu, la durée de la première bouffée augmente si le mouvement doit se poursuivre vers une cible plus éloignée. Par exemple, au niveau 1-1, la durée de la première bouffée est de 252.67 ms. Elle passe à 474 et 449.33 ms au niveau 1-2 et 1-3 respectivement ou encore de 266 ms au niveau 2-2 à 460.67 ms au niveau 2-3. D'autre part, si le mouvement doit être plus court que prévu, on remarque aussi un allongement de la durée de la bouffée agoniste initiale laquelle est liée à la planification d'une cible plus éloignée. Par exemple, par rapport au niveau 1-1,

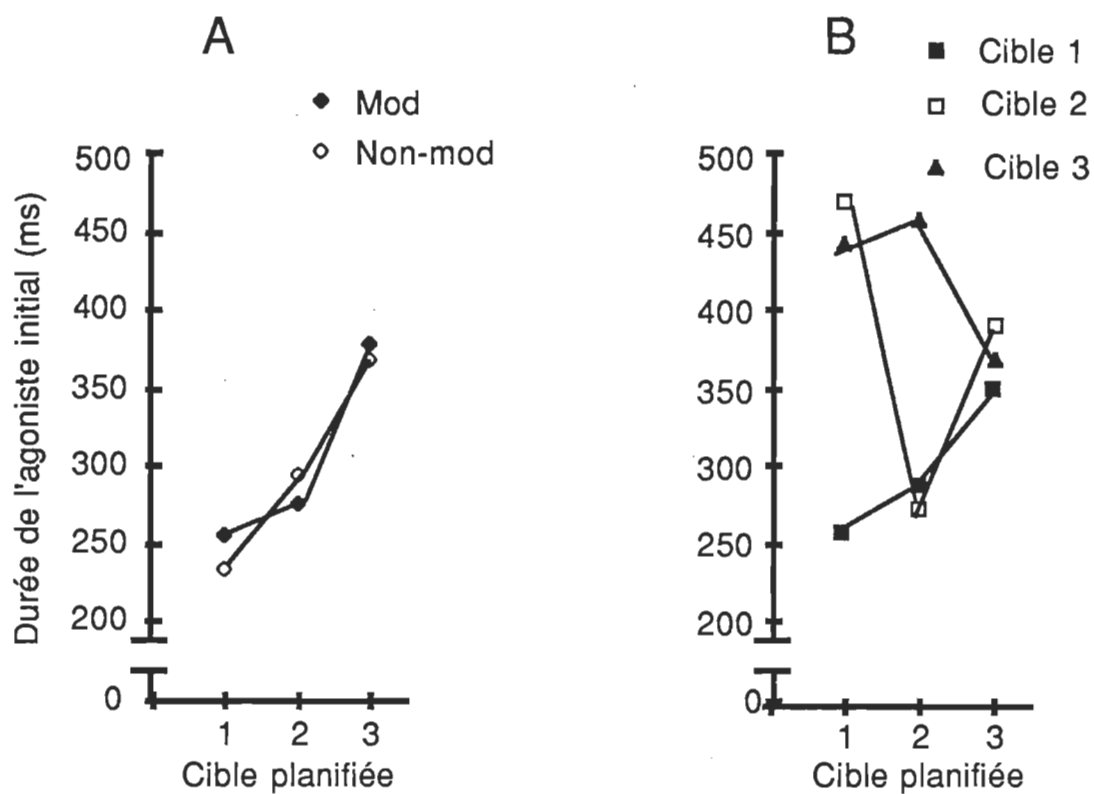


Figure 28. Durée de la bouffée initiale de l'agoniste en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (28a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (28b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

le niveau de cible 2-1 entraîne une augmentation de la durée de 37.83 ms (290.5 vs 252.67) et le niveau 3-1, une augmentation de 97 ms (349.67 vs 252.67). De même le niveau 3-2 voit la durée de la première bouffée agoniste augmenter de 131.85 ms comparativement au niveau 2-2 (397.83 ms vs 266 ms). Le tableau 14 (Annexe A) nous donne les durées moyennes des bouffées initiales de l'agoniste.

En résumé, on constate non seulement que la durée de la bouffée initiale de l'agoniste augmente en fonction de la distance effectivement parcourue mais aussi en fonction de la distance planifiée (selon la cible initiale). Ainsi, même si le mouvement est plus court que prévu, la bouffée agoniste initiale dure plus longtemps parce qu'un long mouvement était préparé.

#### Durée de l'agoniste en phase pré-déplacement

Cette variable nous est apparue pertinente pendant le processus d'analyse du signal EMG. La durée de l'agoniste pré-déplacement (AP) désigne l'intervalle temporel occupé par l'activité agoniste en considérant seulement la période qui précède le déplacement. En tenant compte de la durée de l'agoniste en pré-déplacement, nous sommes en mesure d'évaluer la longueur d'une éventuelle 'période silencieuse' précédant l'amorce de l'activité agoniste. Ce phénomène connu sous le nom de 'Pre-silent motor period' (Yabé et Marachi, 1975) serait le temps que prend le système nerveux

central pour synchroniser l'activité de recrutement des motoneurones alpha en augmentant leur niveau d'excitabilité en fonction de l'effort musculaire prévu. En principe, plus l'effort prévu est important, plus la période de recrutement est longue car plus nombreux sont les motoneurones qui se synchronisent. En contre-partie, une contraction musculaire plus faible s'explique par un moins grand nombre de motoneurones activés et une période de recrutement des motoneurones plus brève.

Milner-Brown, Stein et Lee (1975) ont démontré une activité de synchronisation des motoneurones alpha sur la base de réflexes supraspinaux lors d'une contraction volontaire sollicitant des forces puissantes mais brèves. Ces auteurs soulignent que la synchronisation des motoneurones fait apparaître des différences dans la réponse réflexe du muscle lorsque ce dernier est stimulé électriquement. Dans ces cas, le signal EMG apparaît plus groupé et avec plus d'amplitude alors qu'en absence de synchronisation il a un aspect plus étendu et moins d'amplitude. De plus, Mortimer, Webster et Dukich (1981) et Mortimer et Webster (1983) ont étudié les modifications au niveau du gain et de la latence du réflexe d'étirement du muscle agoniste durant la période de transition de la posture au mouvement. En perturbant mécaniquement par l'application d'une force s'opposant au mouvement, le muscle agoniste dans la période entre le stimulus et le début du mouvement, Mortimer et al, (1981, 1983) ont remarqué trois

composantes distinctes du réflexe d'étirement: la réponse 'M1', impliquant l'activité des voies segmentaires, la réponse 'M2', possiblement due à la combinaison d'activité segmentaire et suprasegmentaire et la réponse 'M3'. Cette réponse tardive est considérée comme étant préprogrammée puisque sa latence et son amplitude dépendent de la préparation du sujet au mouvement. Plus la perturbation se produit près du début du déplacement, plus la réponse 'M3' est importante signifiant ainsi une activité accrue des motoneurones alpha en prévision du mouvement qui sera exécuté. Cette boucle longue permet de régulariser la tension dans le muscle selon les besoins du sujet et est nécessaire afin de vaincre l'inertie lors de l'amorce du mouvement (Mortimer et al, 1981).

Puisque nous enregistrons les 300 ms précédant le mouvement, la période silencieuse est définie comme la différence entre la période pré-déplacement (300 ms) et la durée de l'agoniste pré-déplacement. Une durée courte de l'agoniste pré-déplacement équivaut à une période silencieuse longue et vice-versa.

Il faut mentionner que l'analyse de variance n'a pu déterminer de différences significatives au seuil  $p < .01$ . C'est pourquoi ces résultats sont apportés ici à titre de tendance observée.

La figure 29a nous permet de voir que pour les essais sans modification de cible, plus la cible planifiée est éloignée, plus la durée de l'agoniste pré-déplacement est



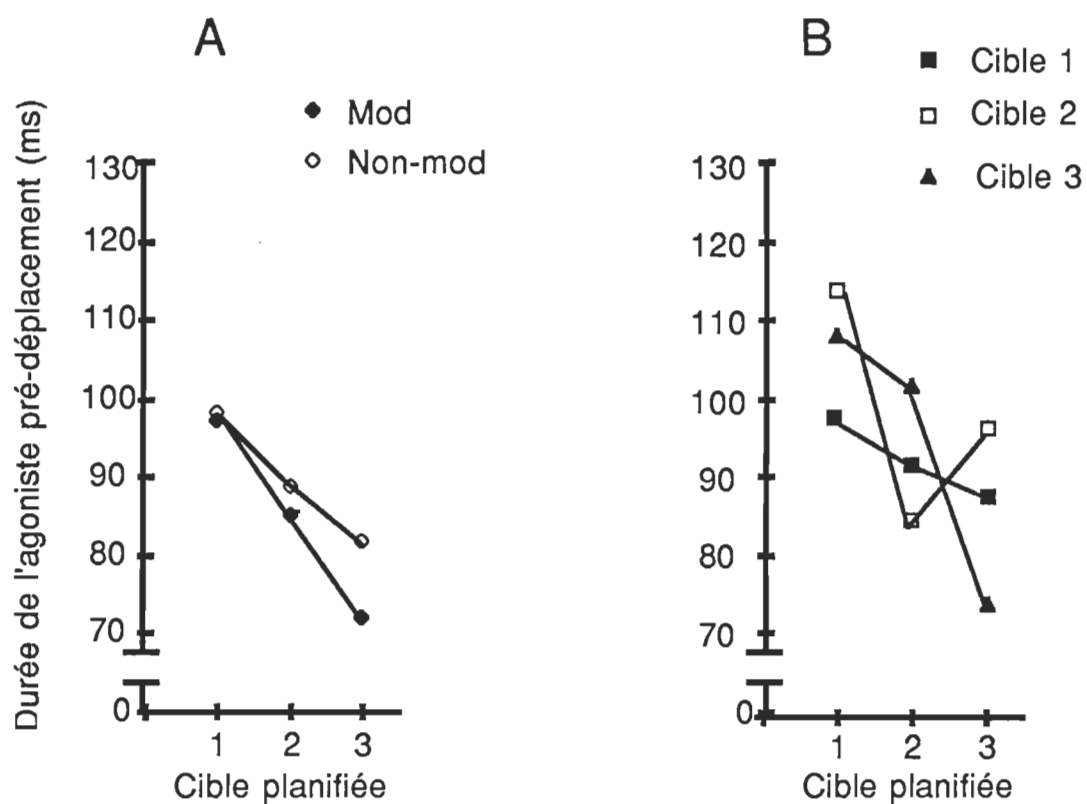


Figure 29. Durée de l'agoniste en phase pré-déplacement en fonction de chacune des 3 cibles planifiées. La partie gauche (29a) résume les deux conditions témoins de cible modifiable mais non modifiée (Mod) et de cible non modifiable (Non-mod). La partie droite (29b) illustre les résultats pour chacune des 3 cibles atteintes sous les conditions de modification.

courte reflétant ainsi une période plus longue de synchronisation des motoneurones alpha. Il semble donc que plus la cible est éloignée, plus l'effort musculaire pour initier le mouvement est important. Cela est en accord avec l'observation déjà faite concernant la vitesse angulaire moyenne. Celle-ci augmente en fonction de la distance à franchir et témoigne d'une activité agoniste plus grande. Sur la figure 29b, les tracés tirés des essais avec modification de cible reflètent aussi cette tendance.

Dans notre étude, comme en aucun temps nous ne perturbons mécaniquement le mouvement, cela explique que seule la réponse la plus tardive, soit 'M3', est apparue. C'est pourquoi, à partir de la durée de l'agoniste pré-déplacement (la réponse 'M3'), il est possible de déterminer la durée de la période silencieuse. Le tableau 15 (Annexe A) résume les durées moyennes observées pour l'agoniste pré-déplacement.

C'est à titre exploratoire que cette variable est examinée. A première vue, la proposition du 'Pre-silent period' à l'effet qu'elle dépend de l'importance de la contraction semble valide. A notre connaissance, cet effet n'a pas encore été systématiquement démontré lors d'un mouvement balistique exécuté en absence de perturbation mécanique ou électrique. Il est néanmoins intéressant de constater qu'il existe une piste qui vaut la peine d'être explorée plus en profondeur.

## CHAPITRE IV

### DISCUSSION

Le but de cette étude est de déterminer si la connaissance préalable de la position terminale à atteindre lors d'un mouvement balistique est une information sur laquelle se construit le programme moteur tel que reflété par l'organisation triphasique des muscles agoniste et antagoniste. Nous passerons en revue les variables utilisées en soulignant l'effet de la connaissance de la cible initiale observé au niveau des paramètres cinématiques du mouvement et de l'organisation du patron triphasique pour les mouvements modifiés et non-modifiés.

#### Temps de latence

Tel qu'attendu le temps de latence augmente en raison de la complexité de la tâche à effectuer (Anson, 1982). De façon générale, c'est lorsque la cible est susceptible d'être modifiée que le temps de latence se montre le plus long. Ainsi, lorsque qu'une modification de cible est possible, le sujet prend plus de temps avant d'amorcer le mouvement. Le fait d'avoir à tenir compte d'une possible modification de cible rend plus complexe la tâche du sujet et l'incite probablement à préparer des réponses

alternatives en cas de besoin. Comme la précision de ces mouvements n'est pas différente de celle observée lors des mouvements sans modification, on ne peut pas conclure qu'un long temps de latence garantit une meilleure exécution du mouvement. Il se peut en fait que les sujets se préparaient davantage à détecter d'éventuelles modifications de cible qu'à programmer le mouvement lui-même. En aucun temps, on ne remarque de tendance à l'effet que plus la cible planifiée est éloignée plus le temps de latence est long. Pour les cibles modifiées, le temps de latence le plus prolongé est observé dans le cas de la cible 2. Cela s'explique par le fait que deux mouvements fort différents sont impliqués: une continuation du mouvement dans le cas d'une modification en faveur de la cible la plus éloignée ou un mouvement plus court dans le cas d'une modification à la cible la plus rapprochée.

#### Temps de mouvement et Vitesse angulaire moyenne

Etant donné que le temps de mouvement est lié à la vitesse angulaire moyenne, nous traiterons d'abord de celle-ci. La vitesse angulaire moyenne semble être largement programmée puisqu'elle est affectée par la cible initialement préparée et que cet effet persiste même lors d'une modification de cible.

En effet, nous avons noté que le sujet sélectionne une

vitesse de mouvement selon la cible visée et que la vitesse angulaire est une fonction directe de l'éloignement de la cible planifiée. Lors d'une modification de cible, cette fonction demeure indiquant ainsi que la vitesse angulaire est planifiée par le sujet à partir de l'information de la cible initialement présentée. Si la vitesse est planifiée, c'est donc que l'amplitude de l'agoniste l'est et possiblement sa durée. Cette conclusion concorde avec celles données par Angel (1975), Brown et al, (1986), Cooke et al, (1985), Wierzbicka et al, (1986) et Forget et Lamarre, (1986). Ces derniers considèrent la bouffée initiale de l'agoniste comme étant programmée mais sensible à des événements périphériques. Lors de modifications de cibles, étant donné que la vitesse a tendance à demeurer insensible à ces changements on peut en conclure que la durée de l'agoniste initial est plus affectée que son amplitude puisque la distance à franchir allonge ou raccourcit. Cela rejoint l'idée selon laquelle les perturbations précédant (Brown et al, 1986) ou suivant le début le mouvement (Angel, 1975) affectent la partie tardive de l'agoniste initial. La première partie demeure telle que prévue, la plus tardive s'ajuste selon le cas. Bien qu'ayant testé indirectement l'amplitude de l'agoniste initial par le biais de la mesure 'REQM', nous remarquons néanmoins que l'amplitude est un facteur qui affiche peu de variations malgré les modifications de cibles.

Pour sa part, le temps de mouvement résulte de la

relation entre la vitesse et la distance parcourue. Il n'est pas programmé à proprement parler mais subit plutôt l'effet de la planification de la vitesse angulaire. Lorsqu'aucune modification de cible n'a lieu, le temps de mouvement, tel qu'attendu, augmente linéairement en fonction de la distance à franchir (Gielen et al, 1985; Soechting et al, 1983). On retrouve cet effet quand le mouvement doit être plus long que prévu. A ce moment, le temps de mouvement augmente parce la vitesse sélectionnée, relativement insensible à la modification de cible, n'augmente pas suffisamment en fonction de la nouvelle distance à franchir. Pour les mouvements plus courts que prévus, on remarque l'inverse. Le temps de mouvement diminue parce que la distance à franchir décroît alors que la vitesse est plus grande, telle que planifiée pour une cible initialement éloignée.

#### Durée de l'accélération

La durée de l'accélération est liée à la position de la cible initiale. Plus la cible présentée initialement est éloignée, plus la durée de l'accélération est grande. Cette observation fut mise en évidence antérieurement par Wadman et al (1979) et Gielen et al (1985). De plus, cette relation demeure en dépit d'une modification de cible. Cette relation est particulièrement vraie pour les mouvements dont la cible effective est plus éloignée que la cible planifiée et dont la durée de l'accélération ne varie pas par rapport à celle

observée lors des essais contrôles.

Dans le cas des mouvements plus courts que prévus, la durée de l'accélération est influencée par la cible initiale bien qu'elle le soit aussi par la cible effective, particulièrement lorsque la cible effective est la plus rapprochée.

La durée de l'accélération est vue comme étant planifiée puisqu'elle est liée à la cible présentée initialement et que cette relation demeure même lors d'une modification de cible. On remarque toutefois une possible adaptation en cours d'exécution si le mouvement est suffisamment petit en distance. Ainsi, la durée de l'accélération peut diminuer selon les besoins même si une plus longue durée était initialement prévue. L'inverse apparaît plus difficile à réaliser. Par conséquent, on peut conclure que la durée de l'accélération est globalement programmée tout en demeurant capable d'adaptation dans les cas où la distance à franchir se modifie surtout dans le sens d'un raccourcissement.

#### Durée de la décélération

On voit dans la durée de la décélération la réciproque de la durée de l'accélération. En absence de modification plus le mouvement est long, plus longue est la durée de décélération. Cependant, on ne peut pas dire qu'elle soit planifiée car elle s'adapte complètement en fonction des

événements, des modifications de cibles et ce, tel que rapporté dans la littérature (Angel, 1977; Jeannerod, 1981). La durée de décélération allonge pour les mouvements plus longs que prévus et raccourcit pour ceux plus courts que prévus. On peut comprendre que pour un temps de mouvement donné, lorsque la durée de l'accélération augmente, la durée de décélération doit diminuer puisque la décélération débute plus tard. A l'inverse, lorsque la durée de l'accélération diminue, celle de la décélération doit augmenter, cette fois-ci parce que la décélération débute plus tôt.

L'allongement ou le raccourcissement de la durée de décélération n'est que le produit des modifications de la durée de l'accélération. Par conséquent, la durée de décélération ne saurait être complètement programmée. A tout le moins on peut considérer qu'elle subit l'influence de la cible initiale en ce sens que le moment relatif du début de la décélération peut être fixé sur la base de la cible initiale. Mais en cas de modification de cible, la durée concrète de la décélération est plutôt ajustée en fonction de la cible effective.

#### Moment de décélération maximale

Le moment de décélération maximale se trouve ajusté en fonction de la cible planifiée initialement. Lorsque la cible effective et la cible planifiée sont les mêmes, on remarque que le moment de décélération maximale est fonction



de la distance à franchir. Plus la cible à atteindre est éloignée, plus il est tardif.

Dans le cas des mouvements plus longs que prévus, c'est-à-dire lorsque la cible atteinte est plus éloignée après avoir visé l'une des deux cibles les plus rapprochées, le moment de décélération maximale subit l'influence de la cible initiale en étant devancé. Cependant, si le mouvement est suffisamment long, on remarque que la relation tient plus difficilement. Ces mouvements étant plus longs en distance et en temps, ils laissent au sujet le loisir de s'adapter et d'en corriger l'exécution.

Dans le cas des mouvements plus courts que prévu, on peut voir l'effet de la planification initiale car le moment de décélération maximale s'y trouve retardé par rapport à ce qu'on observe lors des essais contrôles. Donc, le moment de décélération maximale peut être vu comme étant programmé puisqu'il est influencé par la cible initialement présentée. On remarque cependant que si la cible effective est suffisamment éloignée, le moment de décélération maximale en subit l'effet, c'est-à-dire qu'il s'y ajuste puisque le temps le permet.

A ce stade, on constate qu'un certain nombre de paramètres cinématiques répondent à la planification de la cible initiale alors que d'autres se montrent adaptés en fonction de la cible effective. La vitesse angulaire et la durée de l'accélération apparaissent largement planifiées en fonction de la cible initiale. Cet effet est

particulièrement plus évident si la cible est rapprochée. Lorsque la cible initiale est éloignée, certaines adaptations semblent prendre place suite à une modification de cible. Pour sa part, la durée de la décélération se montre largement adaptée en fonction de la cible effective. Quant au moment de décélération maximale, il est lié à la cible planifiée lorsque le mouvement doit être plus court seulement. En revanche, il s'adapte à la cible effective quand le mouvement doit allonger. On remarque donc qu'à toutes les fois que le mouvement est prévu pour être court en espace et en temps, les paramètres cinématiques sont soumis à la planification initiale, laissant suggérer que tout est planifié en raison du peu de temps dont on dispose. Par contre, lorsque la cible planifiée est éloignée, les paramètres cinématiques sont plus sujet à une adaptation en fonction de la nouvelle cible. Comme on prévoit couvrir une distance plus grande en plus de temps, il ne semble pas nécessaire de préparer autant tous ces paramètres puisque le temps dont on dispose peut justement permettre des ajustements en cours de route.

#### Moment d'entrée en action de l'antagoniste

On sait que le moment d'entrée en action de l'antagoniste est en relation avec la vitesse et l'accélération du mouvement et la distance à franchir (Marsden et al, 1983; Brown et al, 1981; Forget et al,

1986). Pour une distance constante, plus la vitesse est grande, plus l'antagoniste entre en action tôt dans le mouvement alors qu'une vitesse moindre le retarde (Lestienne, 1979; Gielen et al, 1985; Forget et Lamarre, 1986; Marsden et al, 1983). A vitesse constante, plus la distance augmente plus l'antagoniste est retardé alors qu'il est devancé si la distance diminue.

Dans notre étude, on retrouve ces relations pour les mouvements non modifiés. Plus grand est le mouvement, plus tard se montre l'antagoniste. Plus court est le mouvement, plus tôt se montre l'antagoniste.

Cette relation se maintient en partie lors d'une modification de cible. On se souviendra que la vitesse angulaire a tendance à rester relativement constante lors des modifications de cibles. Ainsi, tel qu'attendu, la planification d'un mouvement court entraîne un antagoniste tôt même si la cible finalement atteinte est plus éloignée. A l'inverse, l'antagoniste a tendance à être retardé lors de la planification d'un mouvement long malgré l'atteinte d'une cible rapprochée. La distance à franchir diminue mais l'antagoniste entre tout de même plus tard en action car c'est un mouvement long qui est préparé. Le moment d'entrée en action de l'antagoniste semble donc bien lié à la position terminale prévue.

Cette tendance ne tient pas pour les mouvements dont la cible atteinte est une des deux plus rapprochées après avoir visé la plus éloignée. Nous supposons, puisque ces

mouvements furent parmi les plus souvent ratés (59.4% et 36.4%), qu'ils ont constitué des cas extrêmes. En ce sens, il est possible que la condition de la réussite de ces mouvements soit que l'antagoniste se manifeste malgré tout plus tôt à défaut de quoi l'essai est raté. Ainsi, ces conditions particulières ont contribué à masquer l'effet de la planification du moment d'entrée en action de l'antagoniste. Quoiqu'il en soit, cela représente un bon exemple de la flexibilité et de la capacité d'adaptation du système moteur à des exécutions différentes de celles planifiées. Mais à toutes fins pratiques, on peut constater que la connaissance de la cible initiale influence le moment d'entrée en action de l'antagoniste. Le moment d'entrée en action semble donc être programmé avant le début du mouvement tout en se montrant sensible à la distance à franchir. Pour la cible la plus rapprochée, cette planification est relativement peu sensible à des modifications. Ceci indique que dans un mouvement prévu court, l'antagoniste se manifestera tôt. Ainsi, même si dans ces cas, le temps de mouvement est en principe suffisamment long pour permettre des corrections du mouvement, comme entre autres de retarder l'antagoniste, on s'aperçoit que ce dernier entre en action tôt, c'est-à-dire avant que toute correction ait été entreprise, donc tel que planifié. Il semble donc relativement difficile de désamorcer la commande déclenchant l'antagoniste lorsqu'on prévoit un mouvement court. A l'inverse, le moment d'entrée en action de

l'antagoniste se montre plus facilement modifiable lorsqu'il est prévu plus tard, soit lorsque c'est la cible la plus éloignée qui est planifiée. Il semble donc plus facilement réalisable d'activer au besoin l'antagoniste qui est prévu plus tard, que désamorcer ou retarder l'antagoniste prévu plus tôt. On peut conclure que l'exécution des mouvements courts est liée à une planification robuste, davantage insensible à des événements périphériques étant donné qu'ils sont prévus se dérouler sur une plus brève période de temps. Lorsqu'on dispose de plus de temps, il n'apparaît pas nécessaire de tout planifier puisqu'il est possible de s'ajuster en cours de route. Ces résultats supportent ceux déjà observés par Wadman et al (1979).

Nos résultats vont cependant à l'encontre de la position de Ghez et Martin (1982) en ce qui concerne le moment d'entrée en action de l'antagoniste déclenché sur la base de l'activité réflexe. Si cela était, le moment d'entrée en action de l'antagoniste serait relativement constant pour une vitesse de mouvement donné. Cependant, nous observons, malgré des vitesses de mouvement similaires, des moments d'entrée en action fort différents. Il semble donc que le moment d'entrée en action de l'antagoniste ne soit pas exclusivement réglé sur la base de l'activité réflexe comme le suggèrent Ghez et Martin (1982) et aussi le modèle masse-ressort. La position de Berkinblit et al (1986) se veut davantage une explication possible de nos résultats. Il se peut en effet que le seuil et le gain du réflexe

d'étirement soient modulés centralement à des niveaux différents, c'est-à-dire selon la longueur prévue du muscle antagoniste, en fonction du mouvement planifié et ce, même si la vitesse de mouvement est finalement la même. Ainsi, cela pourrait expliquer qu'en raison du seuil et du gain variables selon les cas, l'antagoniste est sollicité à des moments différents en fonction d'un mouvement prévu court ou long et non en fonction de la vitesse du mouvement.

#### REQM\_d'activité EMG agoniste

Cette variable décrit le comportement du muscle agoniste à la fois en termes de durée et d'amplitude tout au long de l'exécution du mouvement. Nos résultats nous permettent de conclure que l'activité agoniste est réglée sur la base de la connaissance préalable de la position terminale. On sait que plus le mouvement est long, plus la durée de l'agoniste est longue (Wadman et al, 1979, Gielen et al, 1985). La chute de l'agoniste se produit vers le milieu du mouvement, comme c'est le cas dans la présente étude lorsque la cible planifiée et effective est la même. Par contre, lorsque le mouvement est plus court que prévu, c'est-à-dire lorsque le sujet a planifié un grand mouvement mais doit le raccourcir, l'agoniste demeure important pour une plus grande période de temps même si la cible effective est finalement rapprochée. Dans ce cas, la chute de l'agoniste se produit plus tardivement indiquant ainsi que

la durée de l'agoniste est plus longue en prévision d'un plus grand mouvement. A l'inverse, lorsque les mouvements sont plus longs que prévus, l'agoniste est présent et important tout au long du mouvement. Cela se comprend en raison de l'allongement du mouvement par rapport à ce qui était prévu. L'allongement du mouvement entraîne des modifications de l'agoniste plus importantes en termes de durée qu'en termes d'amplitude car si cela avait été, la vitesse de ces mouvements aurait été augmentée suite à une modification de cible, ce qui ne fut pas le cas.

On remarque d'une part, que le REQM de l'agoniste a une légère tendance à augmenter en fonction de l'éloignement de la cible planifiée et d'autre part, qu'il est relativement insensible aux modifications de cibles. Cette observation est particulièrement vraie en ce qui concerne les périodes 1 et 2 pour les mouvements prévus courts et les périodes 1, 2 et 3 pour les mouvements prévus longs. Ces périodes semblent donc être plus liées à la planification du mouvement. Ces résultats correspondent à ceux de Lestienne (1979) concernant la sélection de la vitesse du mouvement donc de l'amplitude de l'agoniste initial et à ceux de Brown et al (1986) et Angel (1975) au sujet de l'insensibilité de l'amplitude agoniste à des perturbations périphériques, du moins pour la première partie du mouvement. En contre-partie, les périodes 3, 4 et 5 (pour les mouvements prévus courts) ou les périodes 4 et 5 (pour les mouvements prévus longs) représentent davantage une période

d'adaptation à la modification du mouvement et semblent donc indépendants de la planification initiale. C'est lors de ces périodes que l'agoniste réagit davantage à la modification de cible en prolongeant son activité ou en la réduisant selon la nouvelle cible. Donc, à l'exception des périodes 1, 2 et parfois 3 qui semblent plus influencées par la planification initiale, les autres périodes se montrent généralement plus affectées par la cible effective en particulier lorsque le mouvement doit s'allonger. On se retrouve donc en présence de deux phases distinctes dans l'exécution du mouvement. La première phase (périodes 1 et 2 pour les mouvements courts, auxquels s'ajoute la période 3 pour les mouvements longs) serait programmée et relativement insensible aux modifications alors que la seconde phase du mouvement serait davantage guidée sur la base de feedback. Les observations concernant la première phase du mouvement supportent l'idée de Lamarre et al (1980) à l'effet que dans la première phase du mouvement, l'utilisation du feedback serait non seulement inutile mais aussi, selon eux, inhibée.

#### REQM\_d'activité\_EMG\_antagoniste

Cette variable indique que la période où l'antagoniste a le plus d'importance est variable selon que le mouvement est planifié court ou long. Cela est en accord avec l'idée citée précédemment à l'effet que la connaissance de la



position terminale règle le moment où l'antagoniste freine le plus le mouvement.

Lorsque l'exécution est telle que prévue, c'est plutôt vers le milieu du mouvement que l'antagoniste est le plus important. Quand un mouvement doit être plus court que prévu, le REQM de l'antagoniste atteint son maximum plus tardivement puisque conformément à la planification d'un long mouvement, la contribution maximale de l'antagoniste est prévue plus tard. Par contre lorsque le mouvement est plus long que celui planifié, le REQM de l'antagoniste atteint son maximum plus tôt (tel que prévu) même si la cible effective se trouve plus éloignée. Dans ces cas, on observe même un antagoniste important tôt dans le mouvement, soit en accord avec ce qu'on observe lorsqu'un court mouvement est prévu. Nos résultats supportent ceux rapportés concernant le fait que pour une vitesse donnée, l'antagoniste est présent tôt dans les mouvements courts et plus tard dans les mouvements longs (Lestienne et al, 1979; Wadman et al, 1979; Angel, 1977; Hallet et al, 1975; Gielen, 1985; Marsden et al, 1983; Forget et al, 1986).

Comme pour le REQM agoniste, il semble que les périodes 1 et 2 soient soumis à la planification du mouvement. L'activité antagoniste observée aux périodes 1 et 2 dépend de la cible visée. Pour les mouvements prévus courts, le REQM de l'antagoniste augmente dès la période 2 même si la cible effective est éloignée. Pour les mouvements prévus longs, la période 2 présente un faible REQM même si la cible

effective est rapprochée. Encore ici, les périodes 3 et 4 semblent être réservés pour l'adaptation du mouvement suite aux modifications imposées par la nouvelle cible effective. L'antagoniste prolonge son activité si le mouvement allonge ou augmente son intensité si le mouvement raccourcit. Quant à la période 5, le REQM antagoniste se montre variable et obtient son niveau le plus bas lors de l'atteinte de la cible la plus éloignée seulement. Notre conclusion sur le comportement de l'antagoniste est que la première partie (périodes 1 et 2) est programmée et peu sensible à des changements alors que la seconde partie peut largement s'adapter aux événements. Ces observations supportent celles déjà émises par Angel (1977).

Pour les mouvements planifiés courts la période où l'antagoniste joue son rôle le plus important semble donc être plus lié à la planification sur la base de la connaissance préalable de la position terminale. Pour les mouvements prévus longs, il semble y avoir plus de possibilité d'ajustements en cours de route particulièrement en ce qui concerne l'amplitude de l'antagoniste aux périodes 3 et 4.

Ratio d'activité EMG agoniste/antagoniste

Cette variable sert à tester l'hypothèse du modèle masse-ressort selon lequel un ratio longueur/tension est spécifié pour chacun des muscles du couple agoniste-antagoniste. C'est lorsque les ratios sont égaux que le point d'équilibre est produit, déterminant la position terminale du membre (Bizzi et al 1978; Polit et al 1978,1979; Lestienne et al 1981). C'est donc lors de l'arrêt du mouvement que les ratios agoniste et antagoniste seront égaux.

Seuls les mouvements se terminant à la cible la plus rapprochée, indépendamment de la cible planifiée initialement, montrent des ratios égaux lors de l'atteinte de la cible. Si le modèle du masse-ressort est juste, il ne l'est que pour les mouvements courts. Contrairement à l'étude de Lestienne et al (1981), nous n'observons pas systématiquement d'égalité dans les ratios agoniste/antagoniste en fonction des deux cibles effectives les plus éloignées. Pour ces plus grands mouvements, les ratios agoniste/antagoniste augmentent en fonction de l'éloignement de la cible effective. Il n'y a donc pas d'évidence de planification du point d'équilibre sur la base de la connaissance préalable de la position terminale dans le cas de l'atteinte d'une cible éloignée. Pour les mouvements à une cible éloignée, nos résultats concordent davantage avec ceux obtenus par Matheson et al (1985) alors qu'ils

indiquaient le manque de corrélation entre les ratios agoniste/antagoniste et la position terminale du mouvement. La position de Berkinblit et al (1986) ne trouve aussi qu'un support partiel en ce sens qu'elle explique le point d'équilibre agoniste/antagoniste, sur la base de l'ajustement du réflexe d'étirement, pour la cible la plus rapprochée seulement. Il faut néanmoins noter que l'utilisation de techniques différentes peut mener à des résultats divergents comme l'on fait remarquer Matheson et al (1985).

Pour faire suite aux observations concernant les différentes périodes définissant la progression du mouvement, on peut dégager une fois de plus que les périodes 1 et 2 semblent soumises aux règles de la planification initiale car les ratios qui y sont observés sont directement fonction de la cible planifiée et se montrent relativement insensibles aux modifications de cibles. A partir de la période 3, les ratios varient selon la cible effective présentée indiquant une large part d'ajustements en cours de route. Cela est particulièrement visible dans les cas des mouvements les plus grands.

En conclusion, la mesure des REQM des activités EMG agonistes, antagonistes et de leurs ratios permet de déterminer que la première partie de l'exécution est plus soumise aux exigences de la planification, c'est-à-dire clairement en relation avec la connaissance de la position de la cible. La seconde partie de l'exécution est plus largement ajustable en particulier lors des mouvements à une

cible éloignée.

#### Durée de la bouffée initiale de l'agoniste

Tel qu'attendu en condition témoin, la durée de la bouffée initiale de l'agoniste est liée à la distance effective (Wierzbicka et al, 1986; Brown et al, 1986; Gielen et al, 1985; Cooke et al, 1985; Lestienne, 1979). Cependant, nos observations nous permettent de déterminer aussi qu'elle est influencée par la distance prévue, c'est-à-dire la distance planifiée sur la base de la connaissance préalable de la position terminale et qui, en cas de modification, est différente de la distance effective.

Plus la cible planifiée est éloignée, plus longue sera la bouffée initiale de l'agoniste malgré l'atteinte d'une cible rapprochée. Dans les cas où le mouvement doit s'allonger après la planification d'une cible rapprochée, la durée de la bouffée initiale de l'agoniste augmente de façon plus spectaculaire. Cette exigence est posée par l'antagoniste qui, ayant été prévu tôt, est entré en action. Le mouvement se trouvant freiné prématurément, l'agoniste doit prolonger son action à la fois en vue de l'atteinte de la nouvelle cible et pour contrecarrer l'activité précoce de l'antagoniste. Il en résulte donc de la co-contraction (Lestienne, 1979; Normand et al, 1982). D'un côté, le bras est accéléré et de l'autre il est freiné.

On constate donc l'effet de la planification de la cible initiale en ce qui concerne la durée de la bouffée initiale de l'agoniste. Cet effet est plus particulièrement évident lorsque le mouvement est plus court que prévu. Lorsqu'il est plus long que prévu, l'allongement nécessaire de la durée de l'agoniste masque l'effet de la planification et fait plutôt voir une adaptation du muscle corrigeant le mouvement. On suppose que cette adaptation fut rendue essentielle afin que les sujets réussissent ce type d'essai qui vient en troisième place parmi les plus fréquemment ratés (35.1%).

#### Durée de l'agoniste en phase pré-déplacement

Par cette variable, nous estimons la longueur de l'éventuelle période pré-silencieuse lors de laquelle se synchroniserait le recrutement des motoneurones alpha et se réglerait leur niveau d'excitabilité (Mortimer et al, 1981, 1983; Yabé et Marachi, 1975). La longueur de cette période varie en fonction du nombre de motoneurones recrutés selon l'effort prévu. On trouve le reflet de cette période par la durée de l'activité agoniste en phase pré-déplacement. Il semble y avoir des mécanismes supraspinaux d'ajustement réflexe dans la période de transition de la posture initiale au mouvement lui-même (Mortimer et al, 1981;1983). L'adaptation la plus importante prend place dans la composante réflexe tardive, c'est-à-dire celle qui se situe

plus près du début du déplacement du membre. Cette longue boucle réflexe constitue un effet facilitateur des motoneurones alpha durant l'activité agoniste initiale dans le mouvement volontaire (Mortimer et al, 1981; 1983). De plus, il semble que cette boucle réflexe soit potentialisée par l'effort volontaire et qu'elle s'associe à l'intention de produire une force puissante mais de courte durée (Milner-Brown et al, 1975).

Comme l'effort nécessaire est plus grand en fonction de l'éloignement de la cible planifiée, on s'attend à retrouver une durée agoniste pré-déplacement plus courte en fonction de la distance à franchir. C'est en effet la tendance qui est observée. Un mouvement planifié court, donc un effort moins important, montre une durée agoniste pré-déplacement plus longue soit plus étendue tel qu'on s'y attend en absence de synchronisation des motoneurones (Milner-Brown et al, 1975). Dans le mouvement planifié long, soit pour un effort plus important, l'activité de synchronisation est présente et tend à produire un signal agoniste plus groupé, lequel occupe moins d'espace temporel. La période silencieuse varie donc en fonction de la planification de la cible initialement présentée. Elle est longue pour les mouvements les plus longs où l'effort requis est plus important. Ces observations concordent avec celles suggérant que la réponse réflexe tardive reflète un mécanisme de régulation de la tension musculaire laquelle peut s'adapter aux besoins du sujet (Mortimer et al, 1981).

## Conclusion

Depuis l'observation de Lashley (1917), nombreux sont les auteurs qui opposent leur vision au sujet de la problématique du contrôle du mouvement. L'éternel débat à l'effet d'un contrôle central ou périphérique fait presque inmanquablement surface à chaque occasion. La solution n'apparaît pas simple ni dans l'une ni dans l'autre des approches. En définitive, il est très malaisé de trancher de façon absolue en faveur de l'une ou l'autre. A tout le moins, la tendance que l'on est en mesure d'identifier dans la littérature à ce sujet suggère à la fois un contrôle central et un contrôle périphérique (Jeannerod, 1981; Arbib, 1985). Cette conception du contrôle moteur s'éloigne de celle qui propose que les commandes motrices sont structurées dans un programme moteur avant l'amorce du mouvement (Keele, 1968) ou de celle qui suggère un contrôle sur la base du feedback périphérique qui, par comparaison à une référence interne, permet l'exécution correcte du mouvement (Adams, 1971). Il est possible que l'étude du mouvement dans des conditions extrêmes puisse nous amener à considérer davantage une approche au détriment de l'autre. Par exemple, il est admis que l'exécution d'un mouvement rapide, pendant lequel la prise et l'analyse du feedback est virtuellement impossible, doit nécessairement s'appuyer du début à la fin sur un programme moteur structuré avant



l'amorce du mouvement. Par contre, l'exécution d'un mouvement lent peut être guidée et corrigée à chaque instant sans nécessiter une programmation antérieure à l'action. Cependant, dans la plupart de nos mouvements quotidiens nous ne rencontrons pas tout à fait l'une ou l'autre de ces conditions d'exécution. Rares sont nos mouvements qui sont tout à fait rapides ou tout à fait lents. De plus, la plupart des mouvements que nous exécutons exigent l'atteinte d'une cible, d'un but dans l'espace. Il devient alors de plus en plus plausible qu'une partie de l'exécution soit soumise à un programme moteur, notamment la phase d'initiation ou d'accélération et que l'autre, c'est-à-dire la phase de décélération, soit davantage guidée à l'aide du feedback disponible (Jeannerod, 1981, Arbib, 1985), bien que cette dernière puisse être grossièrement prévue (Forget et al, 1986).

La présente étude permet d'identifier le rôle de la connaissance préalable de la position terminale du mouvement. Sur la base de cette information, il apparaît possible que des commandes motrices se structurent avant l'amorce du mouvement et demeurent relativement insensibles à des modifications non prévues dans l'exécution. Par exemple, la durée et l'activité globale (REQM) de l'agoniste et par conséquent la vitesse et l'accélération du mouvement sont réglées en fonction de la cible initiale, la position terminale anticipée. Ces résultats concernant l'agoniste appuient ceux déjà observés par Gielen et al (1985), Brown

et al (1986), Cooke et al (1985), Forget et Lamarre, (1986), Lestienne, (1979) et Angel, (1975;1977). Nos observations nous permettent de dire que ces paramètres sont plus clairement en relation avec la connaissance de la position de la cible initiale lorsque la cible planifiée est rapprochée, soit lorsque le temps d'exécution prévu est court. Pour une cible éloignée, c'est-à-dire lorsque le temps d'exécution prévu est plus long, ces paramètres sont plus ajustables en cours de route en fonction d'une modification de cible.

En ce qui concerne la phase de décélération, on peut la voir comme étant en partie programmée (Jeannerod, 1981; Forget et Lamarre, 1986). Les paramètres programmés de la phase de décélération pourraient être le moment d'entrée en action de l'antagoniste (Martin et al, 1982; Wadman et al, 1979; Angel, 1977), le moment de décélération maximale mais non la durée de la décélération puisque cette dernière variable est influencée par les événements ou modifications du mouvement et non par sa planification. En fait, la durée de la décélération se montre variable selon la cible effective. A l'exception de la durée, les paramètres de la décélération s'avèrent plus clairement en relation avec la connaissance de la position de la cible lorsque la cible planifiée est rapprochée. A l'inverse, lorsque la cible planifiée est éloignée, on remarque que les paramètres de la décélération sont largement ajustables en cours de route en fonction de la modification de cible.

Tant pour l'accélération que pour la décélération, des commandes centrales pourraient être responsables de l'exécution des paramètres programmés du mouvement. Ainsi la planification d'un mouvement court pourrait rendre ces commandes plus insensibles aux modifications de cible parce que leur exécution est effective tôt dans le mouvement. Ceci permettrait d'expliquer que les mouvements planifiés courts sont davantage liés à la planification. A l'inverse, la planification d'un mouvement long retarderait le déclenchement des commandes. Comme elles sont latentes, elles peuvent être devancées selon les besoins imposés par une modification à une cible plus rapprochée. Ceci permettrait d'expliquer que les mouvements planifiés longs montrent plus d'ajustements en cours d'exécution.

Pour sa part, la durée de l'antagoniste s'est avérée non significativement différente d'un niveau de cible à l'autre. Cela indique bien le peu d'impact qu'a la connaissance de la cible initiale sur cette variable. Néanmoins, l'hypothèse que des commandes centrales règlent globalement la phase d'accélération et de décélération du mouvement et que des informations périphériques servent aux fines modulations notamment lors de la phase de décélération (Forget et Lamarre, 1986; Sanes et al, 1985; Jeannerod, 1981), semble valide.

Nos résultats ne supportent que partiellement l'hypothèse selon laquelle le moment d'entrée en action de l'antagoniste, sa durée et son activité globale (REQM)

résulteraient de l'ajustement du réflexe d'étirement (Berkinblit et al, 1986; Ghez et al, 1982; Lestienne et al, 1981; Bizzi et al, 1978). Selon cette vision, la vitesse de raccourcissement de l'agoniste entraîne par innervation réciproque la contraction réflexe de l'antagoniste. En comparant les vitesses angulaires moyennes et les moments d'entrée en action de l'antagoniste, on remarque que seuls les mouvements planifiés en fonction de la cible la plus rapprochée ont tendance à se comporter selon les règles du réflexe d'étirement. Pour les cibles éloignées, la possibilité d'ajustement en cours de route engendre que des mouvements exécutés à des vitesses similaires peuvent entraîner des moments d'entrée en action fort différents.

Les résultats obtenus n'appuient aussi que partiellement le modèle masse-ressort selon lequel un ratio agoniste/antagoniste définit la position angulaire terminale du membre. Seuls les mouvements se terminant à la cible la plus rapprochée montrent une égalité des ratios agoniste/antagoniste lors de l'atteinte de la cible. Pour les mouvements à des cibles éloignées les ratios sont variables et augmentent en fonction de l'éloignement de la cible effective. L'égalité des ratios est donc observée lors de l'atteinte de la cible la plus rapprochée seulement, indépendamment de celle planifiée initialement. On en conclut que cette égalité ne peut dépendre que de la localisation de la cible effective et non de celle planifiée puisque dans ces cas la cible effective est toujours la

même, alors que la cible initialement planifiée change. En d'autres mots, pour les mouvements les plus courts, l'équilibre des ratios agoniste/antagoniste n'est pas planifié avant l'exécution puisqu'on l'observe malgré la planification de cibles initiales différentes. Pour les mouvements longs, les ratios ne montrent pas d'équilibre entre l'agoniste et l'antagoniste. Dans le cas de ces grands mouvements, on suppose que l'existence d'activités supplémentaires de l'agoniste soit à l'origine du manque d'équilibre entre l'agoniste et l'antagoniste. Ces activités supplémentaires pourraient être nécessaire pour maintenir l'épaule en adduction plus prononcée lors de l'atteinte des cibles plus éloignées. Une telle activation de l'agoniste pourrait être associée à une inhibition de l'antagoniste lorsque l'articulation se trouve en ces positions extrêmes. Il n'y a donc pas d'évidence, sur la base du modèle masse-ressort, qui nous permette de dire que le point d'équilibre, ou la position terminale, soient planifiés sur la base de la connaissance de la cible initiale. A tout le moins on peut les croire ajustés en cours d'exécution mais seulement pour les mouvements les plus courts.

Cela semble refléter les informations contradictoires rapportées dans la littérature. Par exemple, Lestienne et al (1981) déterminent une corrélation entre le ratio agoniste/antagoniste et la position terminale du membre alors que Matheson et al (1985) rapporte l'absence d'une telle corrélation.

Ce qui supporte l'idée de la relation entre l'activité EMG et la position terminale est la démonstration que la durée de la bouffée initiale de l'agoniste, la durée de l'accélération, le moment d'entrée en action de l'antagoniste et le moment de décélération maximale sont liés à la cible planifiée, en particulier pour les mouvements courts. Concernant le moment d'entrée en action de l'antagoniste, nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par Gielen et al (1985). Concernant notre étude, il s'agit d'un premier pas pour la démonstration de l'idée que le programme moteur puisse spécifier la position finale en réglant un niveau d'innervation relatif aux muscles agoniste et antagoniste.

En définitive, nous sommes en mesure de dire que c'est entre autres à partir de la connaissance préalable de la cible initiale que des commandes centrales globales se structurent pour initier le mouvement selon la réalisation souhaitée. Nous identifions trois paramètres largement influencés par ces commandes comme étant: (a) l'activité agoniste initiale qui détermine la vitesse angulaire et par le fait même l'amplitude et la durée de la phase de l'accélération positive, (b) le moment d'entrée en action de l'antagoniste et (c) le moment de décélération maximale. Pour sa part, la durée de la phase de décélération se montre moins liée à une planification initiale. Au contraire, ce paramètre laisse plutôt voir une adaptation en fonction des modifications introduites dans le mouvement. Les commandes

centrales initiales se déroulent telles que planifiées particulièrement dans la première partie de l'exécution du mouvement soit celle de l'accélération. Dans la seconde partie, soit la décélération, ces commandes se dissocient de la planification et se montrent ajustables selon les besoins, surtout pour les longs mouvements.

L'hypothèse de la cible de MacNeilage (1970) est mieux appuyée en fonction d'une cible rapprochée. Notre étude ne nous permet pas de déterminer si les informations de localisation spatiale de la cible sont traduites au niveau central en termes de coordonnées cartésiennes tel que proposé par Arbib et al (1982) et MacNeilage (1980). Cependant, à l'instar de Jeannerod (1981), nous croyons que l'information initiale de la cible puisse constituer une image du but à atteindre dont les paramètres sont matérialisés dans les zones cérébrales sous la forme d'un programme d'exécution. A partir de nos résultats, il semble que ce programme d'exécution est particulièrement insensible aux modifications pour les mouvements prévus courts. Il montre davantage des capacités d'adaptation sur la base du feedback pour les mouvements prévus longs. La planification des paramètres du mouvement à partir de la connaissance de la position de la cible initiale est donc plus évidente pour les mouvements courts et moins pour les plus longs, du moins pour les mouvements rapides tels que ceux qui ont fait l'objet de la présente étude.

## ANNEXE A

### Tableaux des résultats



Tableau 1

Répartition du nombre d'essais selon les 12 combinaisons  
de cibles planifiées-effectives.

				CONDITIONS											
NON-MOD				MOD											
Cibles															
Planifiées	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Cibles															
Effectives	1	2	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3			
Nombre															
d'essais	21	21	21	77	6	4	9	74	4	9	6	72			

Note: La probabilité d'un changement de cible dans la  
condition NON-MOD est de 38/261, ( $p = .15$ )

Tableau 2

Pourcentage des erreurs de précision (PEP) et des erreurs de temps (PET) selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives, pour l'ensemble des sujets.

NIVEAUX DE CIBLES	NB ESSAIS PREVUS + REPRIS		TOTAL	PEP	PET	TOTAL
1-1	539	45	584	4.5	3.3	7.8
2-1	42	19	61	31.1	0.0	31.1
3-1	28	41	69	56.5	2.9	59.4
NON-MOD	147	13	160	4.4	3.8	8.2
1-2	63	23	86	19.7	6.9	26.7
2-2	518	41	559	4.5	2.9	7.4
3-2	28	16	44	27.3	9.1	36.4
NON-MOD	147	11	158	3.1	3.8	6.9
1-3	63	34	97	5.2	29.9	35.1
2-3	42	6	48	10.4	2.1	12.5
3-3	504	45	549	2.9	5.3	8.2
NON-MOD	147	8	155	1.9	3.2	5.1

Total des essais: 2570  
 Total des erreurs: 302  
 % global d'erreurs: 11.75

Tableau 3

Résultats moyens des temps de latence selon les 12  
combinaisons cibles planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	631.14	727.71	858.57	376.28	*
Cible 2	778.86	1219.57	696.57	382.57	*
Cible 3	787.24	651.86	722	440.28	*

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .01$ .

Tableau 4

Résultats moyens des temps de mouvement selon les  
12 combinaisons cibles planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles Planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	367.68	351.04	339.52	377.5	*
Cible 2	463.6	407.05	384.1	412.14	*
Cible 3	515.95	504	447.77	456.42	*

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .01$

Tableau 5

Résultats moyens des vitesses angulaires selon les  
12 combinaisons de cibles planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles Planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	193.2	203.4	208.9	186.2	*
Cible 2	186.9	211.7	224.3	209.9	*
Cible 3	195.5	200	224	221.8	*

Note: Les résultats sont donnés en degré/seconde.

\* $P < .01$ .

Tableau 6

Résultats moyens des durées de l'accélération selon les  
12 combinaisons de cibles planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles Planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	147.24	162.02	163.66	147.68	*
Cible 2	152.29	175.89	195.15	181.78	*
Cible 3	163.3	173.65	215.98	209.55	*

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .01$ .

Tableau 7

Pourcentages normalisés (1) du temps de mouvement occupé par les moments d'accélération maximale, de décélération maximale, d'entrée en action de l'antagoniste et par les durées d'accélération et de décélération selon les 12 combinaisons de cibles planifiées-effectives pour l'ensemble des sujets.

NIVEAUX DE CIBLES	VARIABLES				
	DA	MAM	DD	MDM	MA
1-1	.41	.16	.59	.68	.19
2-1	.45	.15	.55	.72	.28
3-1	.45	.17	.55	.74	.25
NON-MOD	.41	.15	.59	.68	.20
1-2	.37	.14	.63	.64	.14
2-2	.42	.14	.58	.69	.28
3-2	.47	.16	.53	.73	.28
NON-MOD	.43	.16	.57	.70	.30
1-3	.34	.12	.66	.65	.16
2-3	.36	.12	.64	.64	.18
3-3	.45	.13	.55	.67	.32
NON-MOD	.43	.14	.57	.67	.31

DA: Durée d'Accélération

MAM: Moment d'Accélération Maximale

DD: Durée de Décélération

MDM: Moment de Décélération Maximale

MA: Moment d'entrée en action de l'antagoniste

(1) La normalisation est établie sur le TM moyen de 418 ms.

Tableau 8

Résultats moyens des durées de la décélération pour les  
12 combinaisons de cibles planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles Planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	212.94	197.5	196.34	212.32	*
Cible 2	264.91	241.64	228.28	235.75	*
Cible 3	319.19	308.84	266.52	272.94	*

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .01$ .



Tableau 9

Résultats moyens des moments de décélération maximale  
selon les 12 combinaisons cibles planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles Planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	245.07	259.52	266.58	245.44	**
Cible 2	266.34	286.69	306.16	293.87	*
Cible 3	311.61	308.75	321.48	323.57	N-S

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .01$ .

\*\* $P < .05$ .

Tableau 10

Résultats moyens des moments d'entrée en action de  
l'antagoniste selon les 12 combinaisons de cibles  
planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles Planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	69.3	99	89.4	72.57	**
Cible 2	56.71	116.67	116.71	125.7	*
Cible 3	74.7	85.9	154.4	149.57	*

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .01$ .

\*\* $P < .03$ .

Tableau 11

Résultats moyens des racines de l'erreur quadratique  
moyenne (REQM) (1) de l'activité EMG agoniste selon  
les cinq périodes et les 12 combinaisons de cibles  
planifiées-effectives.

Niveaux de cibles	1	2	Périodes 3	4	5
1-1	3.21	3.53	2.09	2.27	2.24
2-1	3.03	3.63	2.85	2.46	2.72
3-1	2.99	3.85	3.05	2.31	3.06
NON-MOD	2.88	3.25	1.116	2.09	2.16
1-2	3.19	3.42	3.48	3.49	3.18
2-2	2.64	3.65	2.53	2.54	2.84
3-2	2.87	3.81	3.43	2.81	3.32
NON-MOD	2.87	3.63	2.61	2.46	2.7
1-3	3.04	3.28	3.75	3.73	3.78
2-3	3.17	3.31	3.43	3.56	3.6
3-3	2.76	3.69	2.99	3.13	3.56
NON-MOD	2.86	3.57	2.59	2.86	3.4

(1) Les REQM sont transformées par le logarithme naturel.

Tableau 12

Résultats moyens des racines de l'erreur quadratique  
moyenne (REQM) (1) de l'activité EMG antagoniste selon  
les cinq périodes du mouvement et les 12 combinaisons  
de cibles planifiées-effectives.

Niveaux de cibles	1	2	Périodes 3	4	5
1-1	0.01	1.08	3.32	3.26	1.87
2-1	0.09	0.43	3.34	3.69	2.63
3-1	-0.16	0.38	3.26	3.76	2.57
NON-MOD	-0.19	0.95	3.14	3.03	1.8
1-2	-0.16	1.99	2.96	2.79	1.83
2-2	0.04	-0.27	2.79	2.78	1.66
3-2	0.33	0.01	2.48	3.03	2.32
NON-MOD	-0.18	-0.22	2.36	3.07	1.61
1-3	0.14	1.97	2.48	2.22	1.37
2-3	-0.11	1.31	2.7	2.19	0.87
3-3	-0.02	-0.04	2.53	2.69	0.34
NON-MOD	-0.28	-0.08	2.56	2.35	0.47

(1) Les REQM sont transformées par le logarithme naturel.

Tableau 13

Résultats moyens des racines de l'erreur quadratique  
moyenne (REQM) (1) des ratios agoniste/antagoniste selon  
les cinq périodes du mouvement et les 12 combinaisons de  
cibles planifiées-effectives.

Niveaux de cibles	Périodes				
	1	2	3	4	5
1-1	3.2	2.45	-1.06	-0.99	0.37
2-1	2.94	3.46	-0.49	-1.22	0.08
3-1	3.15	3.7	-0.23	-1.45	0.43
NON-MOD	3.26	2.3	-2.12	-0.94	0.35
1-2	3.35	1.42	0.51	0.7	1.35
2-2	2.6	3.66	-0.25	-.023	1.18
3-2	2.43	3.7	1.09	-0.34	0.45
NON-MOD	3.05	3.86	0.24	-0.61	1.09
1-3	2.9	1.31	1.27	1.51	2.4
2-3	3.29	1.99	0.72	1.37	2.72
3-3	2.79	3.74	0.45	0.44	3.21
NON-MOD	3.15	3.65	0.03	0.5	2.93

(1) Les REQM sont transformées par le logarithme naturel.

Tableau 14

Résultats moyens des durées de la bouffée initiale  
de l'agoniste selon les 12 combinaisons de cibles  
planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	252.67	290.5	349.67	237.67	**
Cible 2	474	266	397.83	288.17	*
Cible 3	449.33	460.67	360.17	356.17	N-S

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .03$ .

\*\* $P < .04$ .

Tableau 15

Résultats moyens des durées de l'activité agoniste en  
phase pré-déplacement selon les 12 combinaisons de cibles  
planifiées-effectives.

Cibles effectives	Cibles planifiées				Analyse statistique
	1	2	3	NON-MOD	
Cible 1	97.33	91	88.33	99.67	N-S
Cible 2	112.67	85.83	97.83	89	**
Cible 3	108.5	101.33	72	82.33	*

Note: Les résultats sont donnés en millième de seconde.

\* $P < .03$ .

\*\* $P < .05$ .

## Note de référence

1. Goodale, M.A., Pélisson, D. & Prablanc, C. Large adjustment in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of the target displacement. Departement of Psychology, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.



### Références

- Abend, W., Bizzi, E., & Morasso, P. Human arm trajectory formation, Brain, 1982, 105, 331-348.
- Adams, J.A. A close loop theory of motor learning, Journal of Motor Behavior, 1971, 3, 111-150.
- Angel, R.W. Electromyography patterns during ballistic movement of normal and spastic limbs, Brain Research, 1975, 99, 387-392.
- Angel, R.W. Myoelectric patterns associated with ballistic movement: Effect of unexpected changes in load, Journal of Human Movement Studies, 1975, 1, 96-103.
- Angel, R.W. Antagonist muscle activity during rapid arm movements: central versus proprioceptive influences, Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry, 1977, 40, 683-686.
- Arbib, M.A. Perceptual structures and distributed motor control, dans Brooks, V.B. (Ed.), Handbook of Physiology - the nervous system, II. Motor Control, American Physiological Society, Bethesda, 1448-1480.
- Arbib, M.A. Schemas for the temporal organisation of behavior, Human Neurobiology, 1985, 4, 63-72.
- Anson, J.G. Memory Drum Theory: Alternative tests and explanations for the complexity effects on simple reaction time, Journal of Motor Behavior, 1982, 14, no. 3, 228-246.

- Asatryan, D.G. & Feldman, A.G. Functionnal tuning of nervous system with control of movement or maintenance of steady posture. I. Mechanographics analysis of the work of the joint on execution of the postural task, Biophysics, 1965, 10, 925-935.
- Berkinblit, M.B., Feldman, A.G. & Fukson, O.I. Adaptability of innate motor patterns and motor control mechanisms, The Behavioral and Brain Sciences, 1986, 9(4), 585-599.
- Bizzi, E., Dev, P., Morasso, P. & Polit, A. Effect of load disturbances during centrally initiated movement, Journal of Neurophysiology, 1978, 41, 542-556.
- Bizzi, E. & Polit, A. Processes controlling visually evoked movements, Neuropsychologia, 1979, 17, 203-213.
- Brown, S.H. & Cooke, J.D. Initial agonist burst is modified by perturbations preceding movement, Brain Research, 1986, 377, 311-322.
- Challis R.E. & Kitney R.I. The design of digital filters for biomedical signal processing, Part 2: Design techniques using the Z-plane, Journal of Biomedical Engineering, 1983, 5.
- Cooke, J.D., Brown, S., Forget, R. & Lamarre, Y. Initial agonist burst duration changes with movement amplitude in a deafferented patient, Experimental Brain Research, 1985, 60, 184-187.

- Crossman, E.R.F.W. & Goodeve, P.J. Feedback control of hand movement and Fitt's law, Paper presented at Meeting of the Experimental Society, Cambridge, England, 1963.
- Feldman, A.G. Functionnal tuning of nervous system with control of movement or maintenance of steady posture. II. Controllable parameters of the muscles, Biophysics, 1966a, 11, 565-578.
- Feldman, A.G. Functionnal tuning of nervous system with control of movement or maintenance of steady posture. III. Mechanographics analysis of the execution by man of the simplest motor task, Biophysics, 1966b, 11, 766-775.
- Feldman, A.G. & Orlovsky, G.N. The influence of different descending systems on the tonic stretch reflex in cat, Experimental Neurology, 1972, 37, 481-494.
- Feldman, A.G. Change in the length of the muscle as a consequence of a shift in equilibrium in the muscle-load system, Biofizika, 1974, 19(3), 544-548.
- Fitts, P.M. The information capacity of human motor system in controlling the amplitude of the movement, Journal of Experimental Psychology, 1954, 47, 103-112.
- Forget, R. & Lamarre, Y. Rapid elbow flexion in absence of proprioceptive and cutaneous feedback, Human Neurobiology, 1986, 5.

- Georgopoulos, A.P., Kalaska, J.F. & Massey, J.T. Spatial trajectories and reaction times of aimed movements: Effects of practice, uncertainty and change in target location, Journal of Neurophysiology, 1981, 46(4), 725-743.
- Ghez, C. & Martin, J.H. The control of rapid limb movement in the cat, Experimental Brain Research, 1982, 45, 115-125.
- Gielen, C.C.A.M., van den Oosten, K. & Pull ter Gunne, F. Relation between EMG activation patterns and kinematic properties of aimed arm movements, Journal of Motor Behavior, 1985, 17(4), 421-442.
- Girouard, Y., Proteau, L., Laurencelle, L. & Black, P. A demonstration that target information is used during movement planification, Journal of Human Movement Studies, 1987, 13, 107-133.
- Grillner, S. Locomotion in vertebrates: central mechanisms and reflex interaction, Psychological Review, 1975, 55, 247-304.
- Hallet, M., Shahani, B.T. & Young, R.R. EMG Analysis of stereotyped voluntary movements in man, Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry, 1975, 38, 1154-1162.
- Jeannerod, M. Le contrôle de l'oeil sur le geste, La Recherche, 1981, 120, 376-378.

- Keele, S.W. Movement control in skilled motor performance, Psychological Bulletin, 1968, 70, 387-403.
- Keele, S.W. Behavioral analysis of the movement. dans V. Brooks (Ed.), Handbook of Physiology: Section I: The Nervous System, Vol. II, Motor Control, Part 2. Baltimore,: American Physiological Society, 1981.
- Kelso, J.A.S. Motor control mechanisms underlying human movement reproduction, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 1977, 3, 529-543.
- Lamarre, Y., Bioulac, B. & Jacks, B. Activity of precen-  
tral neurones in conscious monkey: effects of deaffer-  
entation and cerebellar ablation, Journal de  
Physiologie, Paris, 1978, 74, 253-264.
- Lamarre, Y., Spidalieri, G., Busby, L. & Lund, J.P.,  
Programming of initiation and execution of ballistic  
arm movements in the monkey, dans Kornhuber, H.H. et  
Deecke, L. (eds), Motivation, motor and sensory  
processes of the brain: electrical potentials,  
behavior and clinical use, Progress in Brain  
Research, 1980, 54, 157-169.
- Lashley, K.S. The accuracy of movement in the absence of  
excitation from the moving organ, American Journal  
of Physiology, 1917, 43, 169-194.
- Lestienne, F. Effects of inertial load and velocity on  
the braking process of voluntary limb movements,  
Experimental Brain Research, 1979, 35, 407-418.

- Lestienne, F., Polit, P. & Bizzi, E. Functionnal organization of the motor process underlying the transition from movement to posture, Brain Research, 1981, 230, 121-131.
- NacNeilage, P.F. Motor control of the serial ordering of speech, Psychological Review, 1970, 77, 182-196.
- MacNeilage, P.F. Distinctive properties of speech motor control, dans Tutorials in Motor Behavior, G.E. Stelmach & J. Requin (eds), 1980, 607-621.
- Marsden, C.D., Obeso, J.A. & Rothwell, J.C. The function of the antagonist muscle during fast limb movements in man, Journal of Physiology, 1983, 335, 1-13.
- Matheson, J., Hallet, M., Berardelli, A. & Inzucchi, S. Failure to confirm a correlation between electro-myogram and final position, Human Neurobiology, 1985, 4, 257-260.
- Milner-Brown, H.S., Stein, R.B. & Lee, R.G. Synchroniza-tion of human motor units: posible roles of exercises and supraspinal reflexes, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1975, 38, 245-254.
- Mortimer, J.A., Webster, D.D. & Dukich, T.G. Changes in short and long latency stretch responses during the transition from posture to movement, Brain Research, 1981, 229, 337-351.

- Mortimer, J.A., Webster, D.D. Dissociated changes of short and long latency myotatic responses prior to a brisk voluntary movement in normals, in karate experts and in parkinsonian patients, in J.E. Desmedt (Ed.), Motor Control Mechanisms in Health and Disease, New York, Raven Press, 1983, 541-554.
- Morasso, P. Spatial control of arm movement, Experimental Brain Research, 1981, 42, 223-227.
- Normand, M.C., Lagassé, P.P., Rouillard, C.A. & Tremblay L.E. Modifications occurring in motor programs during learning of a complex task in man, Brain Research, 1982, 241, 87-93.
- Prablanc, C., Echallier, J.F., Komilis, E. & Jeannerod, M. Optimal response of eye and hand motor systems in pointing. I. Spatio-temporal characteristics of eye and hand movements and their relationships when varying the amount of visual information, Biological Cybernetics, 1979, 35, 113-124.
- Prablanc, C., Pélisson, D. & Goodale, M.A. Visual control of reaching movements without vision of the limb: I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand, Experimental Brain Research, 1986, 62, 293-302.

- Péllisson, D., Prablanc, C., Goodale, M.A. & Jeannerod, M.  
Visual control of reaching movements without vision of the limb: II. Evidence of fast unconscious processes correcting the trajectory of the hand to the final position of a double-step stimulus, Experimental Brain Research, 1986, 62, 303-311.
- Polit, A., & Bizzi, E. Characteristics of motor programs underlying arm movements in monkeys, Journal of Neurophysiology, 1979, 42, 183-194.
- Rigal, R. L'activité neuromusculaire, dans Motricité Humaine: fondements et applications pédagogiques, Presses de l'Université du Québec, 1985, 127-143.
- Rigal, R. Le contrôle des actes moteurs, dans Motricité Humaine: fondements et applications pédagogiques, Presses de l'Université du Québec, 1985, 305-337.
- Sanes, J.N., Mauritz, K.H., Dalakas, M.C. & Evarts, E.V.  
Motor control in human with large-fiber sensory neuropathy, Human Neurobiology, 1985, 4, 101-114.
- Sherrington, C.S. The Integrative Action of the Nervous System, New Haven: Yale University Press, 1906.
- Schmidt, R.A. A schema theory of discrete motor skill learning, Psychological Review, 1975, 82, 225-260.
- Schmidt, R.A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J.S. & Quinn, J.T. Motor output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts, Psychological Review, 1979, 86, 415-451.



- Soechting, J.F. & Lacquaniti, F. Invariant characteristics of a pointing movement in man, The Journal of Neuroscience, 1981, 1, 710-720.
- Soechting, J.F. & Lacquaniti, F. Modification of trajectory of a pointing movement in response to a change in target location, Journal of Neurophysiology, 1983, 49, 548-564.
- Taub, E. & Berman, A.J. Movement and learning in the absence of sensory feedback, dans Freedman, J. (Ed.), The Neuropsychology of spatially oriented behavior, Homewood, (Ill.), Dorsey Press, 1968, 173-192.
- Terzuolo, C.A., Soechting, J.F. & Viviani, P. Studies on the control of some simple motor tasks. I. Relations between parameters of movements and EMG activities, Brain Research, 1973, 58, 212-216.
- Terzuolo, C.A., Soechting, J.F. & Ranish, N.A. Studies on the control of some simple motor tasks. V. Changes in motor output following dorsal root section in squirrel monkey, Brain Research, 1974, 70, 521-526.
- Wachholder, K. Willkürliche haltunghund bewegung insbesondere in lichte electrophysiologischer untersuchungeer, Ergebnisse der Physiologie, 1928, 26, 568-775.

- Wadman, W.J., Dernier van der Gon, J.J., Geuze, R.H. & Mol, C.R. Control of fast goal-directed arm movements, Journal of Human Movement Studies, 1979, 5, 5-17.
- Wallace, S.A. An impulse-timing theory for reciprocal control of muscular activity in rapid, discrete movements, Journal of Motor Behavior, 1981, 13, 144-160.
- Wierzbicka, M.M., Wiegner, A.W. & Shahani, B.T. Role of agonist and antagonist muscles in fast arm movements in man, Experimental Brain Research, 1986, 63, 331-340.
- Wilson, D.M. The origin of the flight-motor command in grasshoppers, dans Reiss, R.F. (Ed.), Neural theory and Modeling, Standford: Standford University Press, 1964, 331-345.
- Woodworth, R.S. The accuracy of voluntary movement, Psychological Review, 1899, 3, 1-114.