



**UNIVERSITÉ
D'ORLÉANS**



**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ
LABORATOIRE Activité Motrice et Adaptation PsychoPhysiologique**

THÈSE présentée par :

Nabil ILMANE

soutenue le : **11 Mars 2009**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : **STAPS**

**Effets de la contrainte temporelle sur la
coordination Posture/Mouvement : particularité
d'une situation d'anticipation-coïncidence**

THÈSE dirigée par :

Mr. Jaques LARUE

Pr., Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Mr. Jean BLOUIN

CR, CNRS/Université de Provence

Mr. Manh-Cuong DO

Pr., Université Paris-Sud 11

JURY :

Mr. Jean BLOUIN

CR, CNRS/Université de Provence

Rapporteur

Mr. Manh-Cuong DO

Pr., Université Paris-Sud 11

Rapporteur

Mr. Jacques LARUE

Pr., Université d'Orléans

Directeur de thèse

Mme. Anne PELLE

Pr., Université d'Orléans

Examineur

Mr. Martin SIMONEAU

Dr., Chercheur Université Laval (Québec)

Examineur

Remerciements

J'exprime mes plus sincères remerciements à Monsieur le Professeur Jacques LaRue, qui m'a initié à la recherche, pour son encadrement, sa collaboration totale sans limites, sa patience, sa présence, ses conseils très précieux. Ses apports scientifique et humain ont été pour moi considérables, et je lui témoigne une profonde reconnaissance.

Je remercie les Professeurs Jean Blouin, Manh-Cuong Do, Anne Pellé et Martin Simoneau qui m'ont fait l'honneur d'expertiser ce travail et de faire partie de mon Jury de thèse.

Un merci reconnaissant à toutes les personnes qui ont participé volontairement aux expériences souvent longues et difficiles.

Je tiens à remercier mes collègues doctorants ainsi que les membres des laboratoires AMAPP (ex AMCO) d'Orléans et CRAPS de Caen pour leur aide et soutien.

Un merci affectueux aux personnes de mon entourage et de ma famille qui m'ont encouragé tout au long de ce travail.

Je dédie cette thèse

A la mémoire de mon père,

A ma mère.

Table des matières

Introduction	1
PARTIE 1 : CADRE THÉORIQUE	4
Chapitre I : Contrôle postural	5
1. Définition	5
2. Activités posturales	6
2.1. Les préparations posturales	6
2.2. Les réactions posturales déclenchées par les perturbations provoquées par le mouvement	10
2.3. Les ajustements posturaux anticipateurs	12
3. Mécanismes centraux du contrôle postural	13
Chapitre II : Le contrôle des actes moteurs	15
1. Les structures nerveuses du contrôle moteur	15
2. Modèle cognitif du contrôle moteur	20
3. Contrôle moteur et contrainte temporelle	24
3.1. Le modèle réactif	24
3.1.1. <i>Le temps de réaction de choix ou complexe</i>	25
3.1.2- <i>Le temps de réaction et traitement de l'information</i>	25
3.1.2.1. <i>Stade perceptif</i>	27
3.1.2.2. <i>Stade décisionnel</i>	27
3.1.2.3. <i>Stade moteur</i>	28
3.2. Le paradigme Prédicatif / Réactif	29
3.2.1. <i>L'élaboration de la commande motrice en modes réactif et prédictif</i>	33
3.3. L'anticipation-coïncidence	36
3.3.1. <i>Anticipation-coïncidence et la variable tau (τ)</i>	39
3.4. Paradigme Stop et processus d'inhibition	40
3.4.1. <i>Ajustement des délais stop</i>	42
3.4.2. <i>Mécanismes centraux d'inhibition</i>	43
3.4.3. <i>Paradigme stop et tâche d'anticipation-coïncidence</i>	44
Chapitre III : Coordination entre posture et mouvement	46
1. Modes de coordination entre posture et mouvement	47
2. Facteurs affectant les ajustements posturaux anticipateurs (APAs)	48
2.1. APAs et action volontaire	48
2.2. APAs et magnitude de la perturbation	49
2.3. APAs et conditions posturales	50
3. APAs et contrainte temporelle	51
3.1. APAs en mode réactif vs prédictif	51
3.2. APAs en mode d'anticipation-coïncidence	54
Problématique et hypothèses	58
PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES	61
Chapitre IV. Modulation des ajustements posturaux anticipateurs dans les tâches complexes réalisées sous différentes contraintes temporelles	62
1. Introduction	62

2. Méthode	65
2.1. Sujets	65
2.2. Matériel.....	65
2.3. Tâche	67
2.4. Procédure	67
2.5. Traitement des données	68
3. Résultats	72
3.1. Délais entre le début des forces et des accélérations (DFA)	72
3.2. Durées entre le début de chaque courbe et les différents points marqués (Pmin, Pmax, Pimp, TM)	74
3.3. Variabilité	76
4. Discussion	76
4.1. Validité des forces de réaction au sol comme un indice des APAs.....	77
4.2. Modulation du DFA et complexité de la tâche	78
4.3. Changement dans le « timing » entre le début de l'activité posturale et le début de l'activité focale	78
4.4. Différences dans les processus préparatoires entres les conditions AI et AC	81
4.5. Comment les contraintes temporelles influencent-elles les patterns posturaux et focaux ?.....	82
Conclusion	82
Chapitre V. Modulation des APAs dans une tâche d'anticipation-coïncidence.	84
1. Introduction.....	84
2. Méthode	86
2.1. Sujets	86
2.2. Tâche	87
2.3. Matériel.....	87
2.4. Procédure	88
2.5. Traitement des données	90
2.5.1. Analyse cinématique.....	90
2.5.2. Analyse électromyographique	91
2.5.3. Analyse du déplacement du centre de pression.....	91
2.6. Analyse statistique	92
3. Résultats	92
3.1. Caractéristiques mécaniques du mouvement.....	92
3.2. Caractéristiques de l'activité EMG.....	93
3.2.1. Effets de la condition de synchronisation et de la variation du temps avant la cible (Tac)	95
3.2.2. Comparaison des conditions d'anticipation coïncidence (ACdébut, ACFin) à des différents Tac aux conditions réactive et auto-initie	97
3.3. Caractéristiques du déplacement du centre de pression (CP).....	100
3.3.1. Effets de la condition de synchronisation et de la variation du temps avant la cible (tac) sur les paramètres du CP.....	101
3.3.2. Comparaison des conditions d'anticipation coïncidence (ACdébut, ACFin) à des différents tac aux conditions réactive et auto-initiée	102
3.4. Variabilité	104
4. Discussion	105
4.1. Modulation temporelle des APAs en fonction du temps avant la cible en Anticipation-Coïncidence	105

4.2. Modulation de la magnitude des APAs en fonction du temps avant la cible en Anticipation-Coïncidence	107
4.3. Modulation temporelle des APAs et modes de déclenchement	109
4.4. Modulation de la magnitude des APAs et modes de déclenchement	110
4.5. Modes de coordination entre posture et mouvement.....	110
Conclusion	112
Chapitre VI. L'inhibition Focale et Posturale de mouvements préparés en modes réactif et en anticipation-coïncidence.....	114
1. Introduction.....	114
2. Méthode	117
2.1. Sujets	117
2.2. Tâche	118
2.3. Matériel.....	118
2.4. Procédure	118
2.5. Traitement des données	121
2.6. Analyse statistique	121
3. Résultats.....	122
3.1. Essais non inhibés (mouvement déclenché)	122
3.2. Essais inhibés (mouvement de bras inhibé).....	123
3.2.1. Condition Réactive	123
3.2.1.1. Analyse électromyographique.....	123
3.2.1.2. Analyse du centre de pression.....	125
3.2.1.3. Détermination des points bi-sériels	126
3.2.2. Condition d'Anticipation-Coïncidence	129
3.2.2.1. Analyse électromyographique.....	129
3.2.2.2. Analyse du centre de pression.....	129
3.2.2.3. Détermination des points bi-sériels	131
3.2.3. Réactif vs Anticipation coïncidence	133
3.2.3.1. Combinaison des comportements	134
3.2.3.1. Délais entre les seuils	135
4. Discussion	137
4.1. Capacité d'inhibition du mouvement	137
4.2. Inhibition posturale et focale et mode de coordination en condition d'anticipation-coïncidence	139
4.3. Inhibition posturale et focale et mode de coordination en condition réactive.....	140
4.4. Mécanismes d'inhibition et suppression des commandes postural-focal.....	141
Conclusion	143
PARTIE 3 : DISCUSSION & CONCLUSION	144
Discussion générale.....	145
1. Contrainte temporelle et organisation des APAs lors de tâches complexes	147
2. L'organisation des APAs et contrainte temporelle : Particularité d'une tâche d'anticipation-coïncidence	148
3. Coordination posture / mouvement.....	150
Conclusions et perspectives	154
Références Bibliographiques.....	156

Introduction

Le mouvement traduit les réponses de l'organisme aux sollicitations de l'environnement. Il représente également l'actualisation au niveau externe d'une commande motrice bien élaborée et programmée par le sujet. Le traitement de l'information et la commande centralisée du mouvement en constitue deux principes théoriques importants pour l'étude du comportement moteur. Le courant cognitiviste stipule que le sujet construit un modèle interne de la réalité, c'est le concept de représentation. Les opérations cognitives permettent « *la construction à la fois d'une certaine représentation des stabilités prévisibles du monde extérieur et complémentirement d'un certain schéma des états posturaux du corps dans leurs transformations prévisibles au cours du mouvement* » [Paillard (1994): Traité de Psychologie Expérimentale, Chap.III.6. pp : 925-961].

Dès 1967, Piaget envisageait la coexistence d'une machine organisée, qui fonctionne sur la base d'une circuiterie consolidée, et d'une machine organisante, qui a un potentiel d'auto-organisation, d'équilibration et de plasticité. Cette idée est consolidée par la suite avec la distinction entre deux niveaux de traitement de l'information (Allen & Tsukahara, 1974), le traitement sensori-moteur qui permet d'établir une relation directe entre l'organisme et l'environnement, et le traitement cognitif qui alimente la relation que l'appareil cognitif entretient avec la représentation de l'environnement qu'il a constitué dans ses mémoires. Ensuite Paillard a présenté en 1990 [Paillard (1990) : Réactif et prédictif : Deux modes de gestion de la motricité. In : Nougier V. & Blanchi J.P. (Eds). *Pratiques Sportives et Modélisation du Geste*, pp : 13-56] un modèle de contrôle de production motrice, où il y a, à côté des capacités d'une machine réactive, des propriétés d'une machine prédictive qui échappent aux réactivités directes et aux sollicitations de l'environnement. La différence entre ces deux modes de gestion de la motricité se manifeste, au niveau comportemental, par des modifications de coordination inter-segmentaire ou dans la coordination entre les composantes posturale et focale du mouvement. Ces modifications de coordination entre les modes réactif et prédictif sont les conséquences d'une différence dans les processus préparatoires qui se situent en amont de l'exécution de l'acte moteur (aspect externe) lorsque celui-ci est exécuté sous différentes contraintes temporelles.

L'objectif général qui motive ce travail de thèse est de vérifier s'il existe différents modes de gestion de la motricité qui seraient déclenchés par différentes contraintes

temporelles. Nos études expérimentales s'intéresseraient particulièrement à la coordination entre posture et mouvement lorsque l'acte moteur est exécuté en condition réactive, auto-initiée et anticipation-coïncidence.

Les mouvements volontaires provoquent un certain déséquilibre postural. Cela signifie que le système est confronté à deux principales contraintes : (1) une contrainte liée au but à atteindre et (2) une autre contrainte liée au maintien de l'équilibre et / ou d'une posture appropriée (Massion, 1992, 1998 ; Horak & Macpherson, 1996). Le maintien de l'équilibre requière une activité posturale réactrice en réponse à la perturbation, mais cette activité peut survenir également avant le mouvement. En effet, pour optimiser la performance motrice, le SNC génère une activité posturale anticipatrice (APAs) permettant ainsi de minimiser les effets de l'activité focale sur l'équilibre postural. Dans ce cas, l'optimisation de la performance implique une organisation particulière de la réponse en vue de coordonner efficacement les APAs et l'activité focale. Or, on observe certaines adaptations de coordination liées aux exigences du contexte environnemental qui caractérise la situation dont la contrainte temporelle. Par exemple dans une tâche rapide de flexion unilatérale de l'épaule (soulèvement du bras dans le plan sagittal) à partir d'une station debout, des APAs ont été observés au niveau des muscles du membre inférieur et dans les déplacements du centre de pression (CP). Cependant, les patterns des APAs et leur coordination avec l'activité focale sont modifiés selon que le mouvement est exécuté en mode réactif ou en mode prédictif (auto-initié).

Par ailleurs, l'essentiel des recherches examinant la coordination posture / mouvement sous les modes réactif et prédictif utilisent des tâches motrices simples et une situation d'auto-initiation du mouvement dans la condition prédictive. Peu de travaux ont été réalisés dans des tâches proches de celles rencontrées dans les activités sportives ou sous une contrainte temporelle impliquant de l'anticipation-coïncidence (AC). Les gestes sportifs complexes impliquent un nombre important de degrés de liberté et donc requièrent un mécanisme de contrôle spécifique. Il est donc intéressant de vérifier si le modèle réactif / prédictif s'applique à un geste sportif complexe. D'autre part, une tâche d'anticipation-coïncidence constitue une contrainte temporelle intermédiaire entre la condition réactive et la condition auto-initiée. En effet, ce type de tâche implique l'initiation du mouvement de façon à intercepter un mobile à un moment précis. Donc, il est possible que les modes réactif et prédictif interagissent dans une situation d'anticipation-coïncidence pour en constituer un mode de contrôle typique.

Ainsi, pour vérifier s'il existe un mode de contrôle nouveau à côté des modes réactif et prédictif, il est nécessaire d'examiner la coordination posture / mouvement dans une tâche d'anticipation-coïncidence puis les comparer aux contraintes temporelles réactive et prédictive (auto-initié).

Cette thèse s'articule en trois parties :

Dans la première partie (chapitre I, II, III), nous présenterons les éléments théoriques pertinents pour la compréhension du contrôle postural et du contrôle des actes moteurs. Nous développerons principalement les aspects temporels qui caractérisent la posture et le mouvement. Ensuite nous présenterons les liens entre la posture et le mouvement, et les effets de la contrainte temporelle sur la coordination posture / mouvement.

La seconde partie sera consacrée à la présentation d'études expérimentales permettant d'évaluer et de comprendre les effets des contraintes temporelles sur la coordination posture / mouvement. Dans la première expérience, nous vérifierons si les contraintes temporelles réactive et prédictive (auto-initiée) influencent l'organisation posturo-cinétique d'un mouvement sportif complexe issu d'une activité sportive. Nous vérifierons par la suite ces comportements moteurs dans une situation d'anticipation-coïncidence. Dans la deuxième expérience, nous examinerons davantage les APAs et la coordination posture / mouvement dans une tâche d'anticipation-coïncidence. Comme cette contrainte donne la possibilité d'augmenter et de diminuer la pression temporelle grâce à la manipulation de l'objet à capturer, alors nous vérifierons si les schémas posturo-cinétiques dépendent essentiellement de la pression temporelle et / ou du mode de déclenchement. Dans la troisième expérience, nous étudierons l'inhibition des composantes posturales et focales lorsque le mouvement est préparé sous les contraintes temporelles réactive et prédictive (anticipation-coïncidence). Les données de cette expérience nous permettront d'identifier les modes de coordination posture / mouvement qui sont impliqués dans les situations réactive et prédictive. Chacune de ces expériences sera suivie d'une discussion au vu des résultats obtenus et des données de la littérature.

Enfin, dans une dernière partie, nous discuterons l'ensemble de nos résultats et nous mettrons en avant notre contribution à la compréhension de l'influence de la contrainte temporelle sur la coordination posture / mouvement.

PARTIE 1 : CADRE THÉORIQUE

Chapitre I : Contrôle postural

1. Définition

Plusieurs auteurs ont tenté de définir la posture. Selon Thomas (1940), la posture représente la configuration des segments du corps à un instant donné. Massion (1997) la désigne comme étant toutes les attitudes anti-gravitaires dont la fonction est d'assurer le soutien du corps. Pour Paillard (1985), le concept de posture est un terme physiologique qui désigne plus spécialement les positions relatives des diverses parties du corps animés par la musculature squelettique dont l'activité s'oppose à l'action de la pesanteur.

De ces définitions, on peut déterminer deux principaux rôles de la posture (Massion, Alexandrov & Frolov, 2004). Le premier est le contrôle antigravitaire dans le but d'assurer l'équilibre. Suivant les lois de la physique, un corps n'est en équilibre que si son centre de gravité se projette à l'intérieur du polygone de sustentation. Chez l'homme, le centre de gravité est relativement haut alors que le polygone de sustentation est étroit. Par conséquent, la station debout, qui est la posture de référence chez l'homme, résulte d'ajustements permanents contre les effets gravitationnels. Ces ajustements ont été observés par les déplacements du centre de pression sur une plateforme de force en situation debout. En effet, pour assurer l'équilibre, le centre de gravité du corps et le centre de pression doivent être colinéaires, sur la ligne de gravité. Ce maintien de l'équilibre est disposé par une activité tonique des muscles de la chaîne postérieure considérés comme antigravitaires. Toujours selon les lois de la physique, le déplacement d'un segment provoque une modification de la géométrie du corps et de son centre de gravité. Une activité musculaire soutenue est nécessaire pour concevoir un nouvel état d'équilibre.

Le deuxième rôle de la posture est de contrôler la relation entre le corps et le monde extérieur en jouant un rôle d'interface entre la perception et l'action. Dans le contrôle postural, l'orientation spatiale est basée sur l'interprétation des informations sensorielles détectées par les systèmes somatosensoriel, vestibulaire et visuel. Ces informations qui convergent impliquent des systèmes de référence, « *ces systèmes représentent la base des moyens de repérage utilisés par le cerveau pour organiser la perception et l'action* » (Lestienne & Feldman, 2001). Selon Berthoz (1991) et Paillard (1991), il existe trois cadres de référence : Le **référentiel géocentrique** sur lequel se fonde l'organisation de la posture de référence. Il est basé sur le vecteur gravitaire et il appartient au monde extérieur. Le

référentiel égocentrique est centré sur le corps lui-même, où certains segments sont pris comme cadre de référence pour situer les autres segments. Enfin, le **référentiel allocentrique** qui est lié à l'espace extérieur et à des éléments matériels qui ne font pas partie de notre propre corps. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons montrer comment le système postural assume ces rôles de manière efficace.

2. Activités posturales

Gahéry (1987) a classé les activités posturales en fonction de leur moment d'apparition. Il a désigné trois activités : les préparations posturales, puis les réactions posturales déclenchées par les perturbations provoquées par le mouvement et enfin les ajustements posturaux anticipateurs.

2.1. Les préparations posturales

Elles sont mises en place avant le mouvement, et permettent de fixer les articulations sur lesquelles s'appuie le mouvement et anticipe le déplacement du centre de gravité du corps pour maintenir l'équilibre en cours de mouvement. En effet, lors du maintien de l'équilibre, la projection au sol du centre de gravité se situe à l'intérieur du polygone de sustentation. Ce maintien relève d'une activité particulière des muscles anti-gravitaires que l'on qualifie de tonique (Collet, 2002 ; Massion, 1997 ; Dumoulin, DeBisschop & Petit, 1993). Cette activité donne au muscle un degré de consistance et de tensions variables et permet d'orienter et de soutenir le mouvement dans son exécution en lui assurant sa plasticité. Le programme de soutien postural est assuré par la contraction permanente des muscles posturaux (proximaux et axiaux) qui, par leur activité tonique, permettent la conservation du référentiel (Dumoulin *et al.*, 1993). Cette activité naît de programmes centraux primaires, et est ajustée par des informations périphériques. Pour assurer la fonction d'équilibre postural, le système nerveux doit contrôler la position du centre de gravité par rapport au sol, il prend en compte quatre éléments (Massion, 1997) :

a- la valeur de référence régulée : C'est le centre de gravité chez l'homme. Le déplacement d'un segment est accompagné automatiquement du déplacement en direction opposée d'un autre segment en vue de garder la projection du centre de gravité sur la surface d'appui (appelé centre de pression). Gurfinkel (1973) avait montré que centre de gravité et centre de pression évoluent autour d'une même verticale de gravité. Lorsque le centre de

masse sort des limites dans lesquelles le centre de pression peut maintenir cet alignement, l'individu est contraint d'élargir son polygone de sustentation (déplacer les pieds).

- b- le schéma corporel* : Ce concept a été proposé pour la première fois par Head et Holmes en 1911 (cité par Lestienne & Feldman, 2001). Il suggère que le cerveau contiendrait un modèle interne représentatif des caractéristiques et grandeurs biomécaniques du corps. Des études antérieures ont supposé l'existence d'une représentation interne de trois éléments qui permettent d'organiser l'équilibre (Clement, Gurfinkel, Lestienne, Lipshits & Popov, 1984 ; Gurfinkel, Levik, Popov & Smetanin, 1988).
- La géométrie du corps : Il existe une chaîne proprioceptive cinématique, indiquant la position des segments les uns par rapport aux autres depuis les yeux jusqu'au sol grâce aux afférences proprioceptives musculaires. Ces afférences sont stimulées par la vibration des tendons et renseignent sur la position et la vitesse de déplacement des segments. L'analyse des illusions de mouvement, induites par les vibrations tendineuses (Roll R., Velay & Roll J., 1991 ; Lund & Broberg 1983) a montré que le message proprioceptif artificiel issu des muscles extenseurs du pied est traité comme un message d'erreur nécessitant une correction.
 - La représentation des forces d'appui : Les afférences cutanées et proprioceptives de la voûte plantaire ou palmaire paraissent jouer un rôle important dans ces représentations.
 - L'orientation du corps par rapport à la verticale : Elle est liée aux récepteurs multisensoriels au niveau du corps. La position de la tête par rapport au tronc est très importante, elle est indiquée par les propriocepteurs des muscles du cou. Les récepteurs otolithiques et rétinienrs renseignent respectivement sur l'axe gravitaire et l'orientation de la tête par rapport à la verticale. Les études de Gurfinkel *et al.* (1981), Mittelstaedt (1983), Riccio *et al.* (1992), Dietz *et al.* (1992), supposent l'existence de gravicepteurs corporels, ils suggèrent que les récepteurs de Golgi pourraient évaluer l'effort musculaire pour s'opposer à la gravité.
- c- Messages détecteurs d'erreurs* : Une série de récepteurs sensoriels permettent de mesurer l'écart entre la posture actuelle et la posture de référence. Ce sont plusieurs systèmes redondants qui précisent la position générale du corps et de ses parties constituantes. Les différents récepteurs sensoriels permettent à la fois d'assurer la stabilité posturale, le contrôle du mouvement et de participer au sens du mouvement (figure I-1). Plusieurs

systèmes sensoriels sont aptes à détecter les modifications de la position du centre de gravité. Les informations visuelles, vestibulaires, proprioceptives et tactiles constituent des messages rétroactifs (boucle fermée de feedback) utilisées par les programmes posturaux pour maintenir l'équilibre du sujet (Collet, 2002).

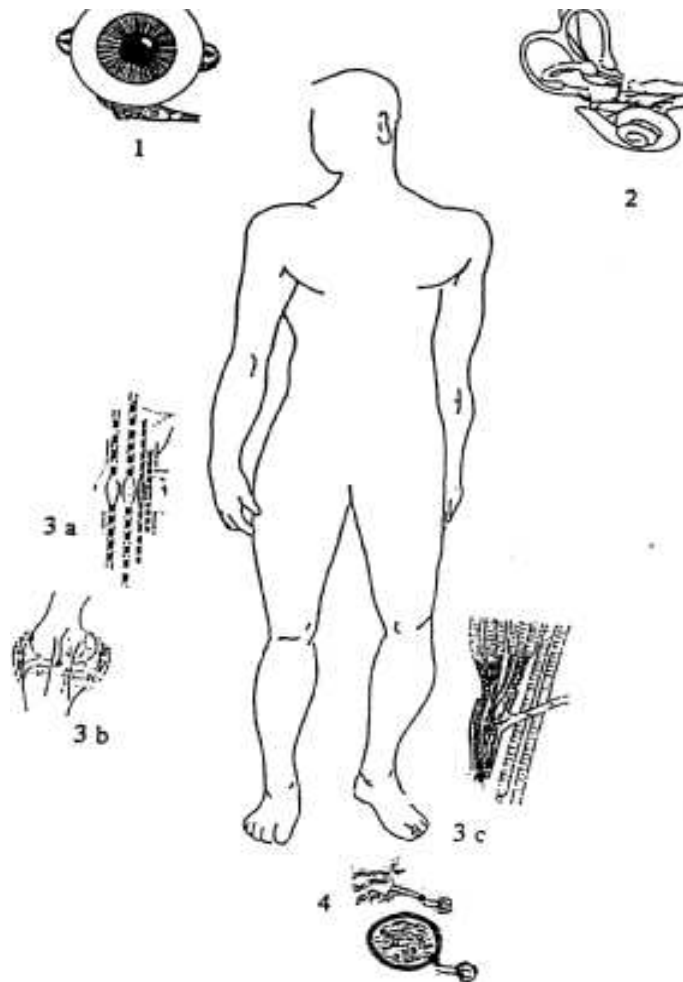


Figure I-1 : Capteurs sensoriels intervenant dans le contrôle de la posture et du mouvement (d'après Perrin & Lestienne, 1994). (1) capteur visuel, (2) capteur vestibulaire, (3a) capteurs fusoriaux, (3b) capteurs tendineux, (3c) capteurs articulaires, (4) capteurs tactiles.

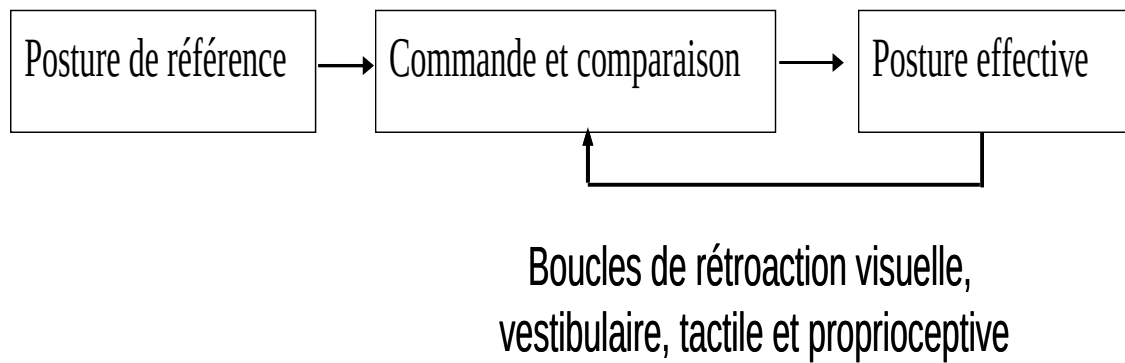


Figure I-2 : Boucles de rétroaction visuelle, vestibulaire, tactile et proprioceptive.
D'après Collet 2002.

- Le système vestibulaire : Il constitue le fil à plomb de notre organisme. Cet organe situé dans l'oreille interne est sensible aux mouvements angulaires et linéaires de la tête (Lestienne & Feldman, 2001). Donc, toute perturbation survenue au niveau de la tête sera détectée par le système qui permet de revenir à la position de référence. C'est un organe à la fois extérocepteur sensible à des données environnementales : gravité et mouvements imposés au sujet ; et propriocepteur : qui détecte tout mouvement de la tête.
- La vision : Renseigne sur la structure et la topographie du monde extérieur et permet de situer le corps dans l'environnement. Elle permet aussi de détecter et d'analyser le mouvement du flux optique (Gibson, 1951, 1966, 1979 ; Lestienne & Feldman, 2001).
- Les récepteurs proprioceptifs : Les afférences fusoriales primaires informent de toute modification de la géométrie corporelle. Elles permettent de mesurer les mouvements des membres, et par conséquent les variations de longueur et de force des muscles ainsi que les rotations articulaires (Massion, 1997 ; Lestienne & Feldman, 2001). Roll *et al.* (1980), Lund et Broberg (1983) ont réalisé une expérimentation qui consistait à stimuler les fuseaux neuromusculaires en appliquant une vibration sur les tendons, ils ont constaté une illusion de mouvements chez le sujet en vue d'une éventuelle correction.
- Les afférences cutanées plantaires : Elles sont sensibles aux changements de l'amplitude et de la direction des forces d'appuis au sol. Cette force est évaluée par les récepteurs tactiles de la plante des pieds. Selon Lestienne et Feldman (2001), ces récepteurs participent à la mécano-sensibilité consécutive à la déformation du derme

liée aux pressions et frottements sur la peau. En position statique, les variations de pression traduisent l'amplitude des oscillations du centre de gravité.

- *le système nerveux central effectue une sélection entre les différentes entrées sensorielles. La sélection est souvent déterminée par le contexte dans lequel le contrôle de l'équilibre doit s'exercer. Le système nerveux central (SNC) peut recalibrer les entrées sensorielles en cas d'inadéquation (microgravité, sports aquatiques etc...).*

d- **Stratégies et synergies :** Pour chaque stratégie du rétablissement du centre de gravité, avant la perturbation, il est possible d'accroître la raideur des différentes articulations, ce qui réduit l'amplitude des perturbations. Par exemple, il existe la stratégie de cheville où le corps pivote autour de la cheville comme une pendule inversée (Horak, 2006). Cette stratégie est établie pour maintenir l'équilibre face à de petites oscillations. Pour faire face à des oscillations plus importantes, la stratégie dite de hanche est utilisée. Il est possible de provoquer une rotation correctrice du corps en déplaçant le bassin pour permettre un déplacement rapide du centre de gravité. Lorsque ces stratégies sont insuffisantes pour rétablir l'équilibre, le pas est ainsi initié. Pour chaque stratégie existe une commande musculaire ou synergie qui met en jeu un certain nombre de muscles répartis au niveau des différents segments.

2.2. Les réactions posturales déclenchées par les perturbations provoquées par le mouvement

L'exécution du mouvement va perturber l'organisation posturale établie et changer la géométrie du corps ainsi que la position du centre de gravité, ce qui implique un déséquilibre. Ensuite, les organisations sensori-motrices vont compenser les déséquilibres enregistrés en déclenchant un programme postural rééquilibrateur. Il existe deux types de coordination entre posture et mouvement. Le premier jouerait un rôle compensateur des déséquilibres provoqués par l'exécution du mouvement en corrigeant les erreurs détectées par les informations sensitivo-sensorielles, afin de rétablir la position de référence (activité réactive). Le second serait anticipateur (voir plus haut), puisque l'expérience permet au sujet de connaître les éventuelles perturbations posturales déclenchées par le mouvement (activité prédictive).

Lorsque la régulation posturale s'effectue *a posteriori*, elle est dite compensatrice. Le système nerveux met en place des synergies cinématiques, par lesquelles les déplacements d'un segment sont accompagnés du déplacement simultané d'un autre segment, dont l'effet est de compenser avec précision le déplacement du centre de gravité qu'aurait produit le mouvement. Ces compensations vont pouvoir réguler les éventuels déséquilibres non prévus dans la commande du mouvement. Ce type d'ajustements est également observé en laboratoire lorsqu'un expérimentateur déclenche des mouvements soudains de translation ou de rotation de la plateforme sur laquelle un sujet se tient debout (Nashner, 1976). Dans le cas où la plateforme est déplacée vers l'avant, le sujet a tendance à s'incliner vers l'arrière. Des synergies musculaires se mettent en place et apparaissent dans les 65ms suivant le début de la perturbation (Dietz, Trippel, Discher, Horstmann, 1991). Ces ajustements posturaux par compensation sont qualifiés de régulation en boucle fermée (Horak & Macpherson, 1996). Ainsi, la commande centrale déclenche le mouvement, celui-ci perturbe le dispositif postural. Les organisations sensori-motrices contrôlant la posture vont la rétablir après l'exécution du geste (figure I-3). Dans ce cas, l'effet de sortie influence l'effet d'entrée, puisque les éventuels déséquilibres sont compensés à la fois pendant l'exécution du mouvement et après celle-ci.

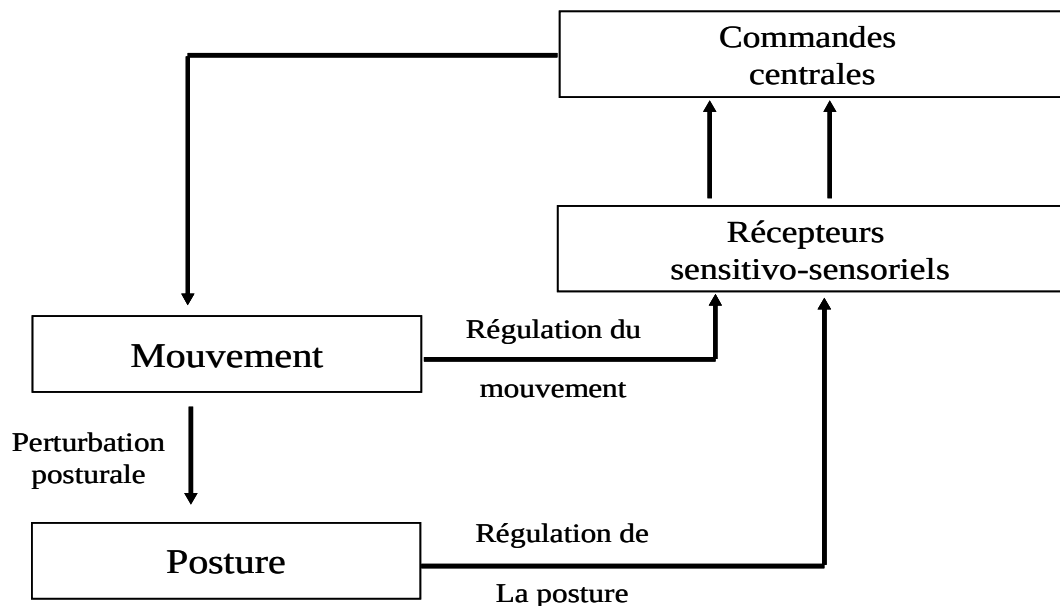


Figure I-3 : Les organisations sensori-motrices contrôlant la posture. D'après Collet 2002.

2.3. Les ajustements posturaux anticipateurs

C'est l'ensemble des manifestations musculaires, dynamiques et cinématiques affectant les différents segments corporels en dehors des parties du corps directement impliquées dans la réalisation du mouvement volontaire. Ces manifestations précèdent le mouvement lui même, et sont considérées comme anticipatrice (Béraud , Gahery & Fabre, 1990; Massion, 1992). Les recherches de Hess (1943) et Belenkii *et al.*, (1967) ont permis de définir la nature anticipatrice des ajustements posturaux dont le rôle consiste à prévenir et compenser, avec un minimum de dépense d'énergie, de possibles perturbations du corps provoquées par l'exécution du mouvement volontaire.

Lorsque les déséquilibres provoqués par le mouvement peuvent être prévus par le sujet, ainsi que les conséquences posturales de l'action, l'ajustement postural peut être intégré à la commande, il s'agit d'une régulation anticipée. Le contrôle de la posture au cours de l'exécution du mouvement subsiste, la perturbation d'origine est réduite (figure I-4). Collet (2002) ainsi que Massion et Viallet (1990, 1997) parlent de *coordination posture/mouvement par anticipation de régulation en boucle ouverte* (contrôle proactif ou feedforward). Selon ce principe, « l'effet de sortie n'influence pas celui de l'entrée : cela implique qu'une régulation anticipée ne peut pas être modifiée une fois le geste déclenché ». C'est bien l'expérience du sujet qui va conditionner en partie ce mode de coordination. Nous développerons les procédures d'exploration des APAs au chapitre III.

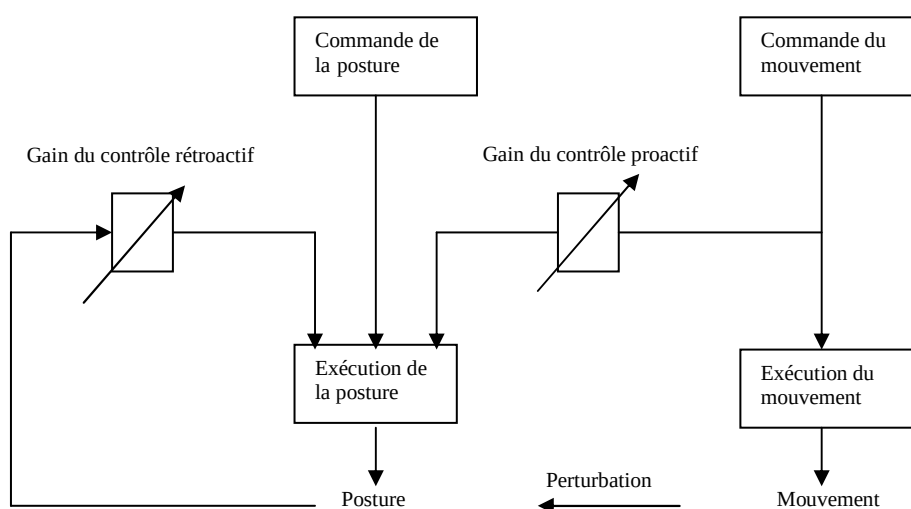


Figure I-4 : Déroulement des ajustements posturaux en feed-back et feedforward suite à un mouvement volontaire. D'après Massion (1997).

3. Mécanismes centraux du contrôle postural

Les études effectuées sur l'animal et sur des sujets pathologiques ont permis de distinguer le rôle du système nerveux central dans le contrôle postural. Il est sous la dépendance des interactions entre les réflexes d'étirement et l'action des structures nerveuses du tronc cérébral, du cervelet, des ganglions de la base et du cortex (Deliagina, Beloozerova, Zelenin, & Orlovsky, 2008).

Les expériences menées sur des chats décérébrés ont montré qu'une partie essentielle du contrôle de la posture basique (se redresser, se mettre debout, marcher) est localisée au niveau du tronc cérébral, du cervelet et de la moelle épinière (Bard & Macht, 1958 ; Magnus, 1924). En particulier, il existe quatre structures au niveau du tronc cérébral qui projettent sur la moelle épinière et qui sont impliquées directement dans le contrôle postural (figure I-5):

(A) *Colliculus supérieur* : reçoit des afférences rétinienne par le champ oculomoteur frontal et des afférences somatosensorielles. Il projette sur la moelle cervicale via le faisceau tectospinal (en passant par la formation réticulaire pontique paramédiane contralatérale) sur le muscle oculomoteur dans le but d'orienter le regard. Ces projections jouent un rôle également dans l'orientation de la tête.

(B) *Noyau rouge* : projette sur la partie latérale de la moelle cervicale via le faisceau rubrospinal, en exerçant une action excitatrice sur les muscles fléchisseur des bras.

(C) *La formation réticulaire* : constitue un réseau complexe dans le tronc cérébral. Elle participe à la régulation du tonus musculaire, mais elle est soumise à l'action du cortex cérébral, du cervelet et des ganglions de la base. Cette structure est à l'origine des ajustements posturaux anticipateurs. Les projections de la formation réticulaire se terminent principalement dans les parties médianes de la substance grise de la moelle. Elle agit sur la musculature axiale et proximale des membres. Elle se subdivise en deux formations. La formation réticulaire pontique (médiane). Elle exerce une action facilitatrice sur les motoneurones α et γ grâce à la voie réticulo-spinale médiane ipsilatérale. Elle facilite le réflexe myotatique et les mouvements commandés par le cortex moteur. La deuxième est la formation réticulaire bulbaire (latérale). Elle exerce une action inhibitrice sur les

motoneurones α des muscles extenseurs, en augmentant leurs seuils d'excitabilité. Cette action est accomplie par la voie réticulo-spinale latérale.

(D) *Noyaux vestibulaires* : Reçoivent principalement des afférences du système vestibulaire et indiquent la position et l'inclinaison de la tête dans l'espace et ses déplacements. Ces noyaux projettent sur la moelle épinière via les faisceaux vestibulospinaux médian. Ces faisceaux ont pour cible la région médiane de la substance grise de la moelle qui agit sur la musculature axiale et proximale des membres, dans le but de faciliter l'excitabilité des motoneurones α .

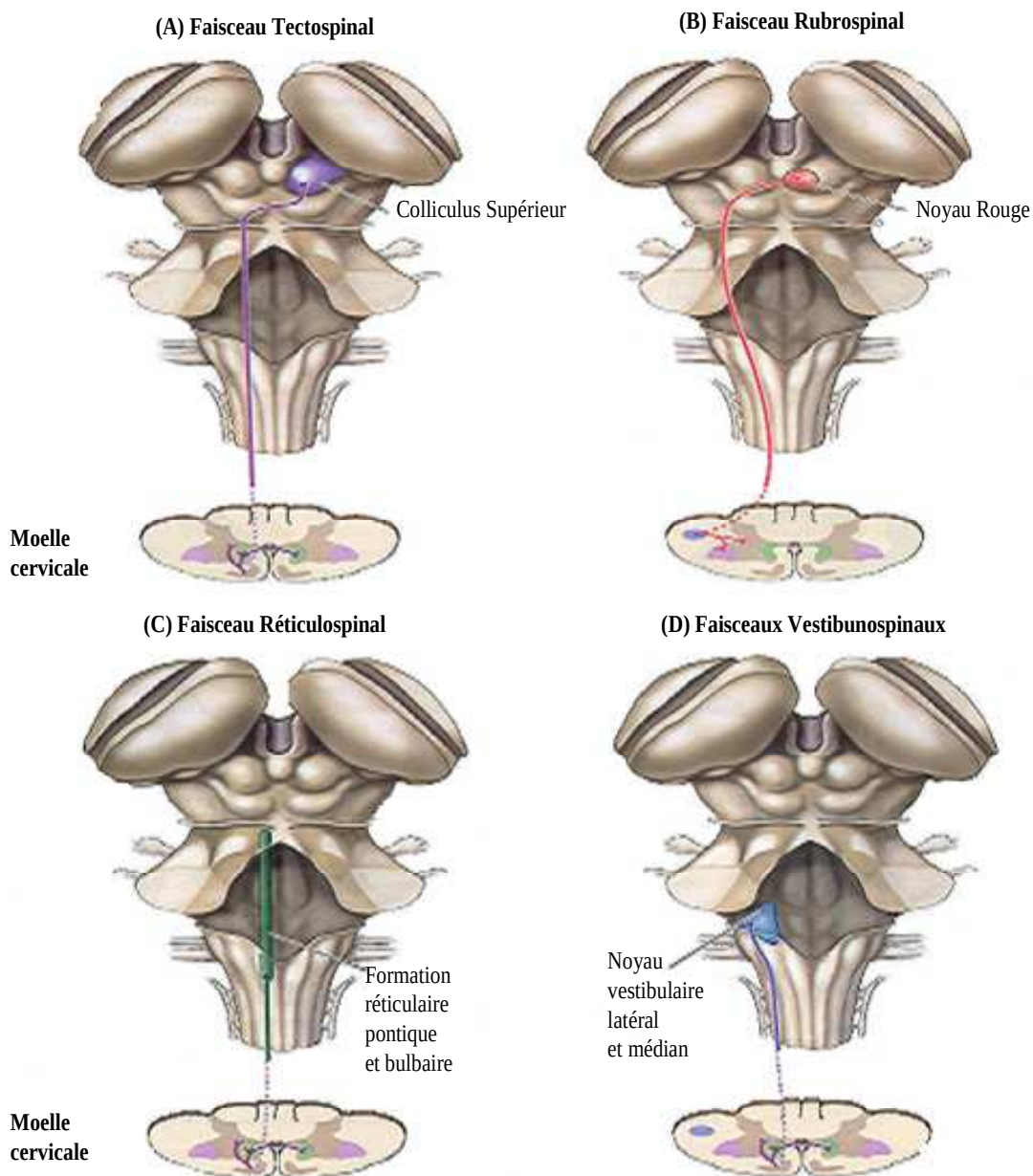


Figure I-5 : Tronc cérébral et ses structures impliquées directement dans le contrôle postural. D'après Purves et al., 2005 (pp : 395).

Chapitre II : Le contrôle des actes moteurs

Si le contrôle postural et le maintien de l'équilibre semblent importants dans la vie quotidienne, la production de mouvements coordonnés l'est davantage. L'acte moteur constitue le moyen par lequel nous entrons en interaction avec notre environnement, mais c'est aussi celui par lequel nous agissons sur lui lorsque cela s'avère nécessaire. Il occupe une place importante dans notre vie d'où l'intérêt grandissant des chercheurs en neurosciences, psychologie expérimentale ou encore en biomécanique pour l'étude de ce comportement. Chacune de ces disciplines a contribué à l'avancement des connaissances de ce phénomène complexe. Ainsi, ces études ont examiné les structures nerveuses impliquant l'acte moteur, notamment grâce aux sujets pathologiques ; aux variations de l'acte moteur en fonction de la tâche, du temps dont on dispose pour la réaliser, de sa complexité et de l'influence de l'environnement au cours de sa réalisation. Ce chapitre sera consacré aux principaux résultats de ces études.

1. Les structures nerveuses du contrôle moteur

Malgré les progrès des techniques d'investigation du système nerveux central, la manière dont le cerveau contrôle le mouvement constitue un défi pour les neurosciences. Plusieurs structures impliquées dans le mouvement ont été identifiées sans pour autant définir avec précision leurs degrés de contribution dans les différents paramètres du mouvement (composantes spatiotemporelle et énergétique) et dans la coordination.

L'activité réflexe relève en grande partie de la moelle épinière. Le réflexe est une réponse musculaire involontaire à une stimulation externe ou interne à l'organisme. On note une grande diversité de l'activité réflexe qui nécessite toujours des voies nerveuses intègres, en particulier celles de la moelle épinière et des voies sensitivo-sensorielles qui la relient à la périphérie. Plusieurs informations peuvent être à l'origine de mouvements réflexes. Les stimulations internes (origine musculaire ou tendineuse) qui nous renseignent sur l'état interne général de l'organisme, et les stimulations externes qui sont captées par les extérocepteurs nous renseignent sur l'environnement.

C'est Prochaska (cité par Jeannerod, 1983) qui le premier définit le réflexe en 1784. Pour lui, il s'agit d'un comportement observé en réaction à une excitation. Les lois du réflexe

seront par la suite précisées par Pflüger, puis par Sherrington (1906). Au début du 20^{ème} siècle, Sherrington avait supposé que le mouvement volontaire n'était qu'une succession de réflexes. Cette interprétation semble aujourd'hui inadaptée. Ce qui spécifie l'activité réflexe, c'est son caractère involontaire qui échappe, pour une, à la conscience du sujet, et qui se réalise sans la participation du système nerveux central grâce à des unités appelées servo-assistance (Paillard, 1994). Ces unités constituent des modules autonomes qui libèrent les commandes centrales des soucis d'une prescription détaillée des commandes musculaires locales.

Le contrôle et la régulation des mouvements volontaires sont assurés par plusieurs aires constituant l'encéphale. Chacune des ses aires a un rôle déterminé dans le contrôle du mouvement volontaire. De nombreuses études ont permis de cartographier (figure II-1) les aires corticales impliquées dans l'organisation de la commande motrice (Roland, Larsen, Lassen & Skinh, 1980 ; Goldberg, 1985; Rizzolati, Luppino & Matteli, 1998 ; Thut, Hauert, Viviani, Morand, Spinelli, Blanke, Landis & Michel, 2000) :

L'aire motrice supplémentaire (SMA) : Fait partie de l'aire 6 de Broadman. Il semble que cette aire joue un rôle dans la coordination bimanuelle ou de mouvements complexes (Erdler Windischberger, Lanzenberger, Edward, Gartus, Deecke & Beisteiner 2001). Contrairement aux autres aires, les SMA de l'hémisphère gauche et de l'hémisphère droit sont connectés. Ce type de connexions favoriserait la coordination bi-manuelle. La SMA semble impliquée également dans la planification de mouvements étant donné qu'elle s'active davantage lorsque le sujet pense à l'action ou que le mouvement est auto-initié (Blouin, Bard, Dyon, Paillard, 2004 ; Wise Stude, Nebel, De Greiff, Forsting, Diener, & Keidel, 2004). Cette aire reçoit des projections du cervelet et des ganglions de la base via le thalamus et projette sur le cortex moteur primaire.

Le cortex moteur primaire (M1) ou l'aire 4 de Broadman, a une fonction exécutoire. Il est à l'origine des voies pyramidales et est le point de départ de plusieurs commandes motrices, notamment celles liées à la motricité fine. Penfield et Rasmussen (1950) ont établi une carte motrice de M1 grâce aux stimulations électriques effectuées sur différentes zones. Ils ont constaté que chaque zone stimulée induisait une contraction musculaire contralatérale très localisée. Quant aux afférences, M1 reçoit de l'ensemble des autres structures motrices

corticales (SMA, Cortex : pré-moteur, pariétal, frontal, et sensori-moteur), et non corticales (ganglions de la base, cervelet).

L'aire pré-motrice (PMC), ou aire 6 de Brodman, est une zone préparatoire du mouvement subdivisée en deux parties (supérieure et inférieure) qui suggèrent, de par leurs fonctions respectives un contrôle prédictif pour la partie supérieure et réactif pour la partie inférieure (Paillard, 1990). Des études ont montré que PMC a un rôle dans les mouvements guidés visuellement (Boussaoud, Barth & Wise, 1993), et un rôle dans l'apprentissage et l'imitation en raison de l'existence de neurones miroirs (Rizzolatti, Fadiga, Gallese & Fogassi, 1996).

L'aire pré-frontale, ou aire 46, participe à la préparation des mouvements et joue le rôle d'un régulateur spatiotemporel de l'action. C'est donc une aire d'anticipation, elle maintient l'état de préparation motrice jusqu'au moment où l'information appropriée en assurera le déclenchement (Massion 1984, cité par Collet 2002).

Le cortex pariétal (aires 5, 7) est également impliqué dans la préparation des mouvements et plus spécialement dans le guidage visumoteur (saisie d'objets) grâce aux informations proprioceptives du cortex visuel et sensori-moteur (S1).

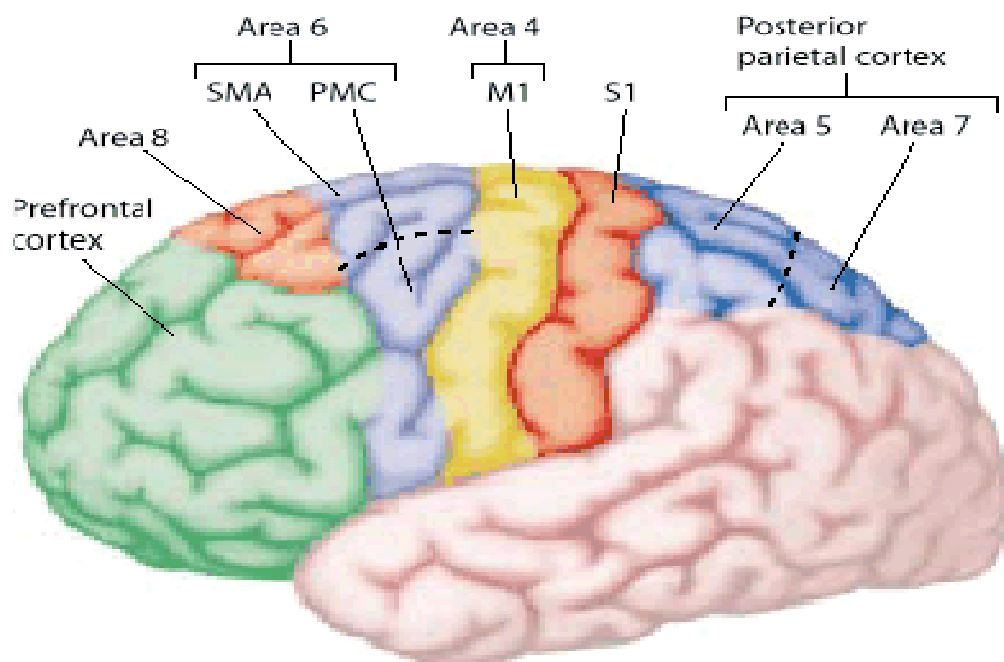


Figure II-1 : Aires corticales impliquées dans la préparation et l'exécution de mouvements volontaires.

En plus des structures corticales, on attribue un rôle important aux structures non corticales impliquant les ganglions de la base et le cervelet. Un dysfonctionnement des ganglions de la base tels que dans les maladies de Parkinson et de Huntington altère considérablement la motricité volontaire. Les ganglions de la base sont composés de cinq noyaux interconnectés: le globus pallidus, le noyau caudé, le putamen, le noyau subthalamique et la substance noire. Il existe plusieurs boucles, reliant les ganglions de la base au cortex qui sont concernées par différents aspect du comportement moteur, qui requière de l'attention, la cognition et la volition (Brooks, 1995 ; Middleton & Strick, 2000). Le putamen et le noyau caudé reçoivent des afférences somatotopiques du cortex frontal, temporal, pariétal et occipital, et les utilisent dans la préparation du mouvement. D'après Rolls et Williams (1987), le noyau caudé combine les stimuli et les mouvements (sélection, planification), tandis que le putamen est impliqué plus dans la préparation à l'exécution (surtout la direction). Les efférences proviennent principalement du pallidum et à un degré moindre, de la substance noire. Elles sont projetées sur les aires pré-motrice, SMA et pré-frontale via le thalamus, et sur le tronc cérébrale (Hikosaka et al., 2000).

Le cervelet est considéré comme une structure majeure dans la préparation, le contrôle et l'apprentissage moteur. C'est une structure qui permet également de coordonner les séquences temporelles du mouvement (Brooks & Thach, 1981). Ces hémisphères reçoivent des afférences vestibulaires (contrôle de l'équilibre), somesthésiques (articulations), sensorielles et corticales (aires 4 et 6, aires pariétal, somatosensorielle et occipitale). Les afférences des aires motrices passent par les noyaux du pont avant de projeter sur les hémisphères du cervelet. Ensuite, le cervelet agit en envoyant des efférences au cortex via le thalamus (c'est la boucle cortico-ponto-cérébello-thalamo-corticale), et des efférences au tronc cérébral. Ces projections assurent le mouvement volontaire, mais également la posture et l'équilibre.

Le schéma de la figure II-2 résume le rôle et l'ordre d'activation des différentes structures dans l'organisation du mouvement volontaire. Les structures corticales et subcorticales sont impliquées dans l'intention de produire un mouvement, ensuite le cortex associatif (frontal et pariétal) ainsi que les aires corticales SMA et PMC sont impliquées dans la planification. Lorsque celle-ci est achevée, des commandes sont envoyées vers l'aire motrice primaire (M1). A partir de M1, il existe une voie directe acheminant vers la moelle épinière (voies cortico-spinale et cortico-réticulo-spinale) et une voie indirecte relie par deux

boucles les ganglions de la base et le cervelet. La première boucle permettrait de lisser les commandes, tandis que la deuxième est chargée de corriger les commandes en cas d'erreurs (comparateur).

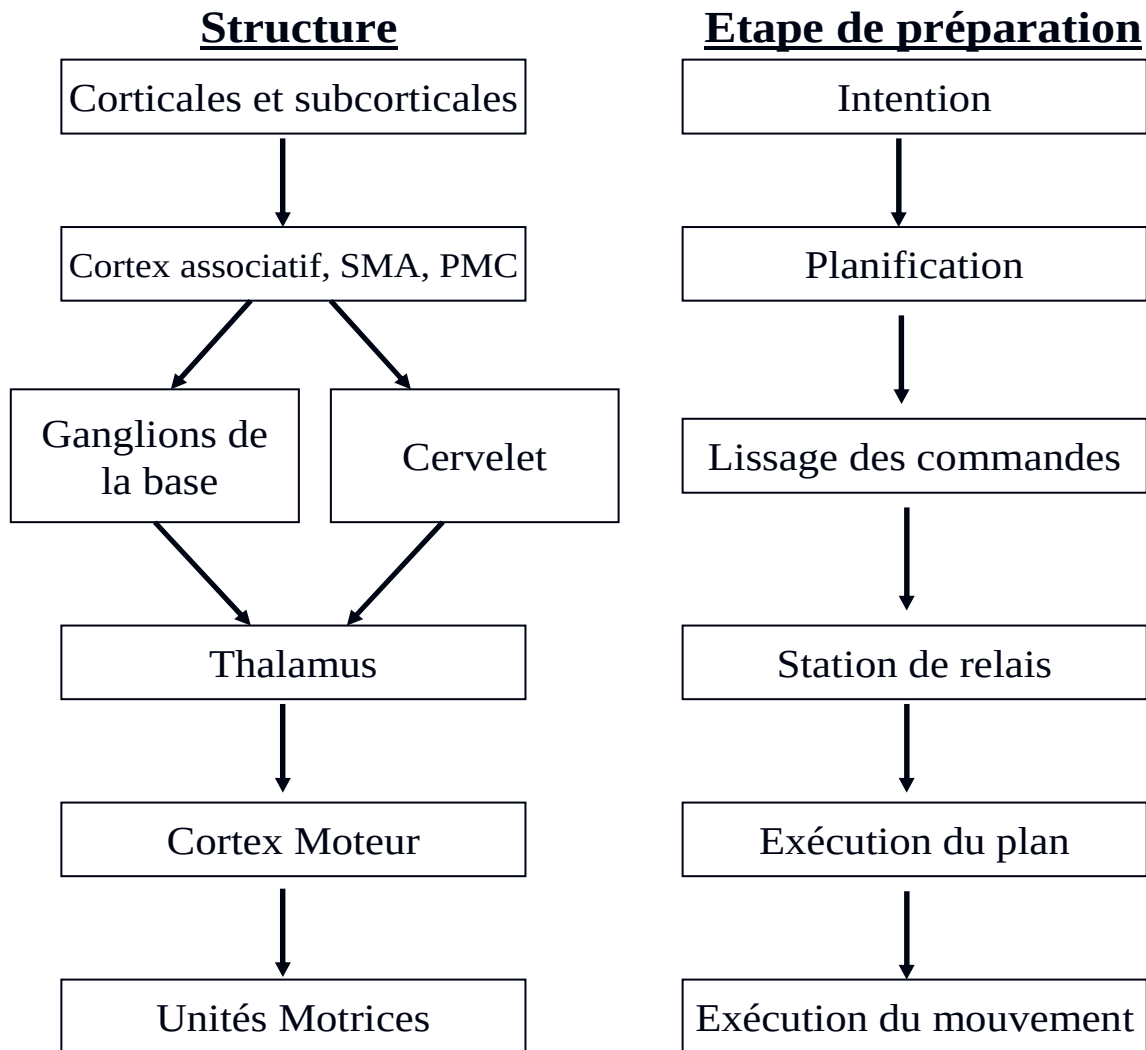


Figure II-2 : Schéma représentant l'organisation générale du mouvement. À droite on peut voir les différentes étapes ; à gauche les structures qui sous-tendent chaque étape.

2. Modèle cognitif du contrôle moteur

Il existe deux grandes approches dans le domaine du contrôle moteur, l'approche cognitive et l'approche écologique / dynamique. Ces deux approches se différencient par le rôle qu'elles accordent au SNC dans la production du mouvement. L'approche écologique considère que le système possède des propriétés d'auto-organisation qui ne nécessitent pas une paramétrisation précise de la commande motrice et que l'information qui spécifie l'acte moteur est directement disponible dans l'environnement (Kelso & Fuchs, 1995). L'approche cognitive attribue un rôle important aux processus mentaux qui régissent le mouvement. Pour elle, le cerveau est prescripteur des intentions, des programmes et de l'exécution des actes moteurs (Schmidt & Lee, 1999). La suite de cette présentation sera consacrée à ce deuxième modèle.

Une opération est qualifiée de cognitive lorsque « *le référent de l'opération est la représentation interne mémorisée de l'environnement qui devient source autonome des signaux mobilisateurs et régulateurs de l'action, et/ou de l'évocation imagée dans l'expérience consciente* » (Paillard, 1985). Ces opérations permettent de produire des actes volontaires délibérés, traduisant à la fois l'existence d'une intention, d'un projet d'action et celle d'une volonté de traduire cette intention en actes. Les neurophysiologistes parlent d'une anticipation des conséquences sensorielles de l'action. Ce sont les processus mentaux supérieurs mis en jeu dans la genèse de l'expérience perceptive et des conduites motrices orientées vers un but qui sont à l'origine de ces opérations (Paillard, 1990). Cet ensemble d'opérations est désigné sous le nom de programme moteur (PM). Lashley (1917, cité par Larue, 2004) est le premier à avoir utilisé le terme de PM pour qualifier les processus impliquant le mouvement, pour lui « *c'est l'intention à agir qui détermine la séquence des événements à produire* ». Cette notion s'est progressivement développée en schéma (Bartlett, 1932) puis en plan (Miller, Galanter & Pribram, 1960). C'est Keele (1968) qui a donné la définition la plus utilisée aujourd'hui en neurosciences. Il considère le PM comme « *un ensemble de commandes musculaires structuré avant le début d'une séquence de mouvement et qui permet à la séquence entière de s'exécuter sans influence de feed-back périphérique* » (Keele, In Larue & Ripoll, 2004, pp. 36).

Le programme moteur fonctionne selon un mode de contrôle en boucle ouverte ou feed-forward (figure II-3). Dans ce mode de contrôle, tous les paramètres du mouvement sont

fixés avant l'exécution du mouvement et il est impossible de les modifier en cours d'exécution. Le mouvement est ainsi initié et contrôlé en l'absence de retours sensoriels. L'utilisation de retours sensoriels dans certains types de mouvements, dits balistiques, n'est pas possible, car ils sont réalisés dans un bref délai ne permettant pas aux retours sensori-moteurs d'intervenir (Bernstein, 1967). Dans certains cas (déafférentation) ces retours sont même complètement absents (Cole & Paillard, 1995), mais le système nerveux reste malgré tout capable d'assurer la production et le contrôle de certains mouvements. On parle également de modèle interne (Paillard, 1990), où le feed-back est négligé. Le modèle est construit en se basant sur l'expérience antérieure. A chaque fois qu'un mouvement est produit, une copie dite d'efférence est envoyée dans le modèle interne. Ce modèle interne permet par la suite de prédire les conséquences sensorielles du geste.

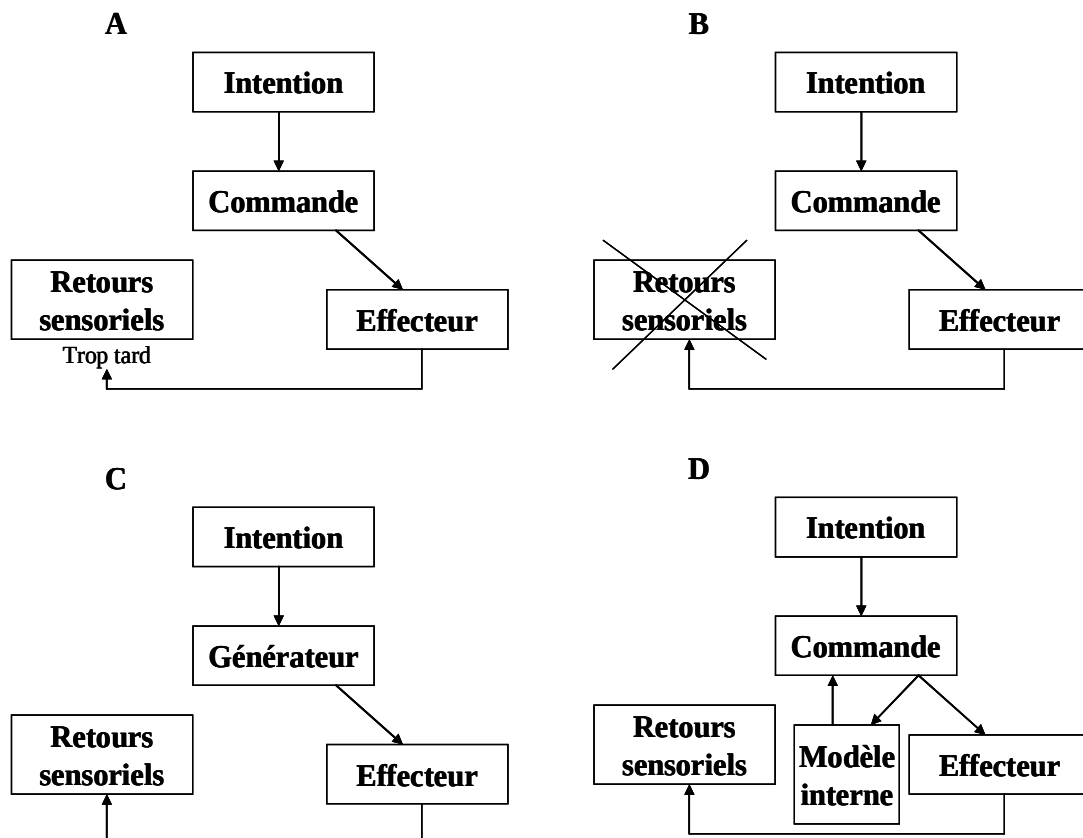


Figure II-3 : Schéma représentant différents contrôles en boucle ouverte (d'après Marin & Danion, 2005). A : mouvements balistiques ; B : absence de retours sensoriels ; C : des générateurs centraux suffisamment autonomes pour produire un mouvement sans feedback ; D : Mouvement selon un modèle interne.

Or, le problème posé est de savoir si le SNC est capable de stocker autant d'informations concernant une multitude de mouvements que nous exécutons quotidiennement, et possédant des caractéristiques biomécaniques et spatiotemporelles variables. A cela s'ajoute les nouvelles habiletés et la flexibilité qu'elles requièrent. On donne souvent l'exemple du joueur de tennis, qui pour renvoyer la balle, produit des gestes complètement nouveaux, car il existe plusieurs combinaisons possibles impliquant la vitesse de la balle, son angle de vol, ses différentes trajectoires, à cela s'ajoute la position du joueur ainsi que celle de l'adversaire sur le terrain. En réponse à ce problème, Schmidt (1975) proposa alors le programme moteur généralisé (PMG). Pour Schmidt, il existe un PMG pour chaque catégorie de mouvements possédant les mêmes patrons invariants. Ce programme représente une certaine catégorie de mouvements (exemple des lancers), et certains paramètres peuvent être modifiés uniformément les uns par rapport aux autres (accélération, temps de mouvement...etc.) pour garder ainsi la même structure d'invariants. Par exemple lorsque le temps de mouvement est modifié, d'autres aspects du mouvement changent également, tel que la force, la durée des contractions, la vitesse des membres. Mais il existe des structures de base qui sont invariantes dans un PMG, la plus importantes est la structure temporelle. Elle réfère au ratio des durées de plusieurs intervalles dans le mouvement. Si on considère deux mouvements issus du handball : une passe à bras cassé et un tir en appui. Ces deux mouvements s'exécutent de la même façon mais à des vitesses différentes. Si on mesure la durée de contraction des muscles impliqués dans les deux mouvements, on trouve que le rapport de la durée d'activation de chacun des muscles par rapport à la durée totale est invariant. Ce pattern de rapport caractérise par la suite ce mouvement. Une illustration de ce concept pourrait être fournie par l'écriture. Par exemple, l'écriture d'un même mot à des vitesses différentes entraîne une variation de la durée de l'écriture de chaque partie du mot proportionnellement au temps total mis pour écrire ce mot (Viviani & Terzuolo, 1980).

Comme tout programme, il est nécessaire d'analyser le résultat du programme moteur pour vérifier si la sortie correspond à l'intention et si des erreurs subsistent pour pouvoir les corriger. Un autre système de contrôle en boucle fermée permet d'apporter les corrections nécessaires. Pour se faire, le système utilise les réafférences générées au cours de la réalisation de l'action par rétroaction. Tout écart entre mouvement réel et souhaité donne un signal d'erreur, qui à son tour génère une commande pour compenser l'erreur. Lorsque ces boucles s'appuient sur des circuiteries neuronales n'impliquant pas l'intention du sujet, le contrôle est dit automatique. C'est le type de contrôle qu'on observe dans les préparations

posturales (chapitre I). Lorsque la correction initiée implique l'intention du sujet, la correction est considérée comme volontaire. Les délais de rétroaction sont plus longs qu'en réponse automatique mais les réponses sont plus adaptées aux exigences de la tâche.

Le modèle conceptuel du contrôle en boucle fermée (figure II-4, Schmidt & Lee 1999) fournit un système plus complet correspondant aux performances motrices. Ce modèle est utile pour comprendre les traitements qui s'effectuent sur des mouvements longs, où les corrections peuvent s'effectuer en cours d'exécution, mais également les mouvements relativement rapides où la correction s'effectue à la fin du mouvement. Un système superviseur permet l'identification du stimulus, sélection, puis programmation de la réponse. Ce système envoie un programme moteur aux niveaux inférieurs impliquant la moelle épinière qui à son tour sollicite les muscles considérés pour produire le mouvement. Au même temps, une référence des retours sensoriels qui sont attendus si le mouvement est correctement exécuté est envoyée à un comparateur qui les contraste avec les retours sensoriels effectifs reçus suite au mouvement. Les erreurs détectées sont par la suite envoyées au système superviseur pour affiner le comportement moteur.

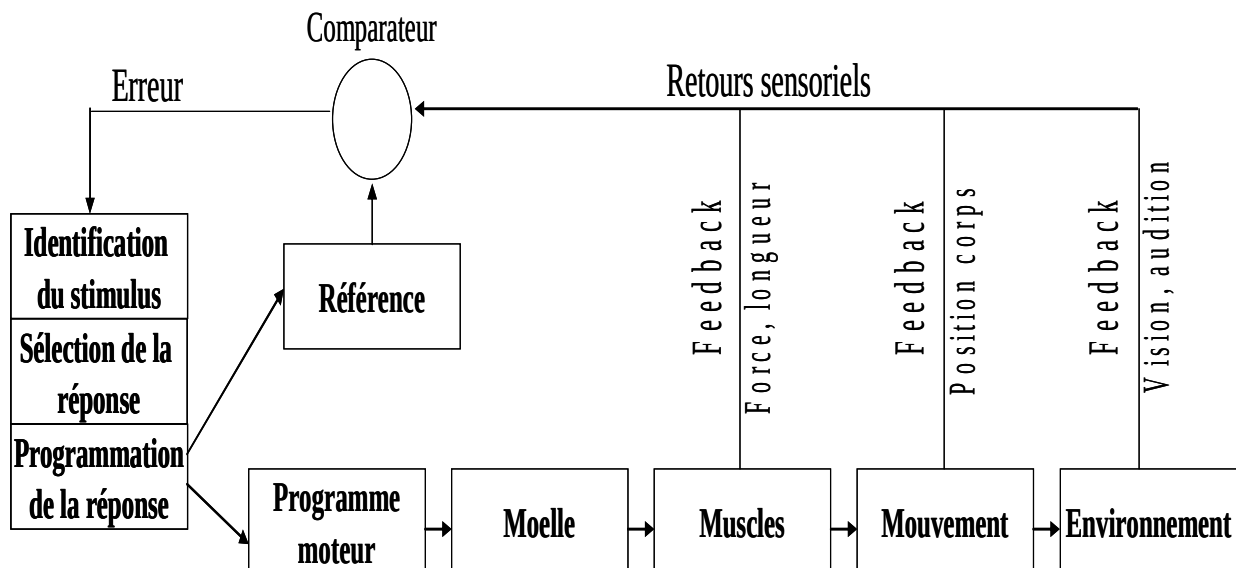


Figure II-4: Schéma du modèle conceptuel de la performance motrice (d'après Schmidt & Lee, 1999). Des éléments de feedback sont intégrés aux différentes étapes de traitements. Les retours sensoriels sont acheminés vers un comparateur pour les confronter aux conséquences attendues. Les éventuelles erreurs détectées sont envoyées au superviseur.

3. Contrôle moteur et contrainte temporelle

L'exécution de mouvements volontaires est soumise à des contraintes temporelles variables. Ainsi, lorsqu'on est appelé à prendre une tasse de café sur une table, l'exécution du mouvement est réalisée sous une pression temporelle nulle. En revanche, si quelqu'un a accidentellement touché la tasse et l'a fait tomber de la table, il faut alors réagir rapidement pour éviter la chute. Plus le temps mis pour réagir est court, plus les chances d'éviter la chute seront grandes. Dans ce cas, la contrainte temporelle devient très forte. Si la tasse a amorcé sa chute, il faudrait déplacer la main en anticipant la trajectoire de façon à ce que la main coïncide avec la tasse à un endroit précis. Dans ce cas, la contrainte temporelle est variable en fonction de la hauteur de la table. Enfin, si au moment où on décide de réagir à cette chute on s'aperçoit que la tasse contient du café chaud et on risque de se brûler, on devrait stopper ou inhiber rapidement la réponse pendant sa préparation ou pendant l'exécution, et la contrainte dans ce cas redevienne forte. Les contraintes temporelles s'accroissent davantage dans le domaine sportif, où la performance est primordiale. Les effets de ces contraintes temporelles sur le comportement moteur sont largement étudiés en laboratoire. Les études, pour la plupart, sont orientées vers l'identification des fonctions de transfert, c'est-à-dire des opérations formelles permettant de relier les variations des paramètres d'entrée du système (contrainte temporelle) à celles des paramètres de sortie (performance motrice). Elles ont débouché, par la suite, sur des modèles : réactif, prédictif (projectif), anticipation-coïncidence et le paradigme stop.

3.1. Le modèle réactif

Dans les expériences de laboratoire impliquant une tâche de temps de réaction simple, la chronométrie est cruciale. Dans ces tâches, le sujet est appelé par exemple à presser sur un bouton le plus rapidement possible à l'apparition d'un stimulus. La performance du sujet est évaluée au travers du temps de réaction (TR) lequel représente le délai minimum d'apparition de la réponse volontaire déterminée en réponse à un stimulus donné. Chocholle (1936) définit le TR comme étant « le délai le plus court entre une réponse simple, ayant le caractère habituellement volontaire, et une incitation initiale prenant la forme d'un stimulus ». Le stimulus est souvent précédé par un signal de préparation. L'intervalle entre le signal de préparation et le stimulus est appelé période préparatoire (PP) (Klemmer, 1956 ; Drazin, 1961). La PP doit être optimale pour que le sujet se prépare convenablement. Si elle est très courte, il n'aura pas le temps de se préparer. À l'inverse, si elle est trop longue il aura des

difficultés à estimer la fin de la PP, on observe alors une baisse de vigilance. La PP optimale (c'est-à-dire donnant le TR le plus court) se situe aux environs de 500ms (Posner & Boies, 1971 ; Mattes & Ulrich, 1997).

Des études menées par Klemmer (1956) ; Drazin ; (1961) ; puis Nickerson et Burnham (1965) ont montré l'influence de la PP sur le TR. Lorsque la PP est constante, les sujets arrivent à estimer cet intervalle et anticiper le moment d'apparition du stimulus, réduisant ainsi le TR. Cependant, l'estimation est plus difficile lorsque la PP est longue. Lorsque la PP est variable, l'incrément de variation entre les différentes PP est important. Si cet incrément est court, les sujets ne peuvent pas deviner la PP impliquées dans l'essai, donc le TR augmente. En revanche, si l'incrément est grand, la probabilité que le stimulus apparaisse dans l'instant d'après augmente avec l'écoulement du temps. Ce raisonnement suppose une internalisation de la distribution des séries d'intervalles bien définis, grâce à une horloge interne. Lorsque l'objet de l'étude ne concerne pas spécialement la PP, celle-ci est déterminée de façon aléatoire sur un intervalle de temps donnée. Ce principe limite les tentatives d'anticipation.

3.1.1. Le temps de réaction de choix ou complexe

Dans une situation de temps de réaction de choix, il y a au moins deux stimuli S1 et S2, auxquelles sont associés deux réponses R1 et R2. Lorsque l'un des deux stimuli apparaît, le sujet doit déclencher la réponse correspondante le plus rapidement possible. On assiste généralement à l'augmentation du TR de choix avec l'augmentation des possibilités de stimulus-réponse. La loi de Hick (1952) et de Hyman (1953) montre que le TR de choix est une fonction logarithmique résumée par l'équation :

$$\mathbf{TR\ (choix) = a + b\ (Log^2\ (N))}$$

Où : N représente les alternatives possibles, a et b étant des constantes.

3.1.2- Le temps de réaction et traitement de l'information

Les psychologues considèrent le TR comme étant le délai nécessaire pour effectuer une série de traitements de l'information qui est donnée en entrée, pour aboutir à une performance motrice (sortie). Ce modèle de traitement de l'information suppose que le processus complexe de production du mouvement peut être décomposé en plusieurs étapes

indépendantes. Ces étapes opèrent de façon sérielle. L'information est transformée d'une forme à une autre aux travers de différents stades ; et chaque stade requière une certaine durée. Plus le stade de traitement est complexe, plus l'accomplissement de la tâche est long. Donders (1868) a pu mettre en évidence différents stades de traitement impliqués dans la production de l'acte moteur. Un stade de discrimination, un stade de décision et un stade de l'initiation de la réponse. Il a essayé de mesurer le temps nécessaire pour chaque stade en concevant trois tâches, chaque tâche est conçue pour contribuer à un stade de traitement. La première tâche (a) implique un temps de réaction simple avec une pair stimulus-réponse. Cette tâche mesure le temps nécessaire pour l'initiation de la réponse. La deuxième (b) est une tâche de temps de réaction de choix, elle devrait inclure les trois stades de traitement. Dans la troisième tâche (c), il a utilisé le paradigme du Go-NoGo, où il y a plusieurs stimuli mais une seule réponse. Le sujet devrait répondre uniquement à l'un des stimuli. Cette tâche implique vraisemblablement les stades de discrimination et de l'initiation de la réponse, mais pas le stade de décision, car il n'y a pas d'autres alternatives de réponse. En comparant les différents TR, Donders cherchait à mesurer le temps nécessaire pour chaque traitement cognitif. Le temps de l'initiation de la réponse est le TR en « a » ; le temps de discrimination est estimé par la soustraction des TR « c-a » ; et le temps de décision est estimé par « b-c ».

Cette méthode appelée «soustractive » était sévèrement critiquée car on supposait que les modifications introduites dans les tâches n'ont pas d'influence sur la durée ou sur le nombre de stades qui existent déjà. Mais dans les années 1960, il y a eu un regain d'intérêt aux procédures de Donders. Dans le souci de voir l'influence des différents facteurs sur les stades de traitement de l'information, Sternberg (1969) avait élaboré la méthode « additive ». Cette méthode permet d'étudier l'influence d'un ou plusieurs facteurs sur l'un ou plusieurs stades de traitement et comment différents facteurs interagissent. Si les effets de chaque facteur s'additionnent, on suppose alors que chacun affecte un stade différent. Si ces effets se multiplient (tel que révélé par des interactions entre les facteurs), on présume que les facteurs affectent simultanément le même stade de traitement. Grace à cette méthode, Sternberg (1969) avait identifié trois principaux stades de traitement : un stade perceptif, un stade décisionnel et un stade moteur. Les travaux de Schmidt (1983) et Sanders (1990) ont permis, par la suite, de subdiviser chaque stade en différentes étapes (Figure II-5) et de décrire l'ensemble des facteurs les influençant directement.

3.1.2.1. Stade perceptif

C'est un stade essentiellement sensoriel qui permet d'analyser les informations provenant de l'environnement. Il s'agit de percevoir et d'identifier la situation dans laquelle un sujet est engagé. D'abord, il faudrait détecter l'information utile à l'action en cours. Par exemple un gardien de football qui subi un « corner » doit détecter la position du ballon, des adversaires et de ses partenaires. Par contre, il fait abstraction sur la position de l'arbitre, du bruit des supporters etc... Ensuite, en analysant le stimulus impliquant le ballon, le gardien identifie les contours et la couleur du ballon, puis sa vitesse et trajectoire. Enfin, le niveau d'expertise du gardien lui permettrait de reconnaître (ou pas) certaines informations du stimulus (déplacement du ballon) pour prévoir la position du ballon à un instant donnée. Une erreur dans l'identification des stimuli pourrait nuire à la performance motrice.

3.1.2.2. Stade décisionnel

Une fois que les stimuli sont bien identifiés, une étape de sélection de la réponse est engagée. Il s'agit de choisir parmi les différentes alternatives de réponse celle qui est la plus appropriée compte-tenu de la situation. Dans notre exemple, le gardien doit choisir de faire une sortie aérienne pour capter le ballon, ou de se déplacer seulement sur sa ligne. La présence de ces deux alternatives de réponse semble être couteuse temporellement que s'il existait seulement une possibilité de réponse telle qu'en situation de temps de réaction simple (TRS). Cependant, le déplacement des attaquants dans la surface de but accroît l'incertitude et augmente ainsi le nombre d'alternatives de réponses pour le gardien. L'adversaire tire profit de cette situation pour augmenter le TR tel que démontré par Hick (1952).

Un autre paramètre qui influence la prise de décision et le TR est la compatibilité stimulus-réponse (S-R). On dit que la réponse est compatible avec le stimulus lorsque celle-ci est associée naturellement. En restant sur notre exemple, on suppose que le ballon prend une trajectoire au sol après le « corner ». Si le gardien renvoie le ballon du pied, on dit que le S-R est compatible, en revanche le S-R est incompatible si le gardien intercepte le ballon avec les mains. Dans ce cas (S-R incompatible) le TR augmente. Or, dans ce contexte la prise de balle avec les mains est nécessaire et le gardien la réalise sans grande difficulté. En effet, il est possible de modifier le caractère incompatible d'une relation S-R d'un point de vue chronométrique par la pratique.

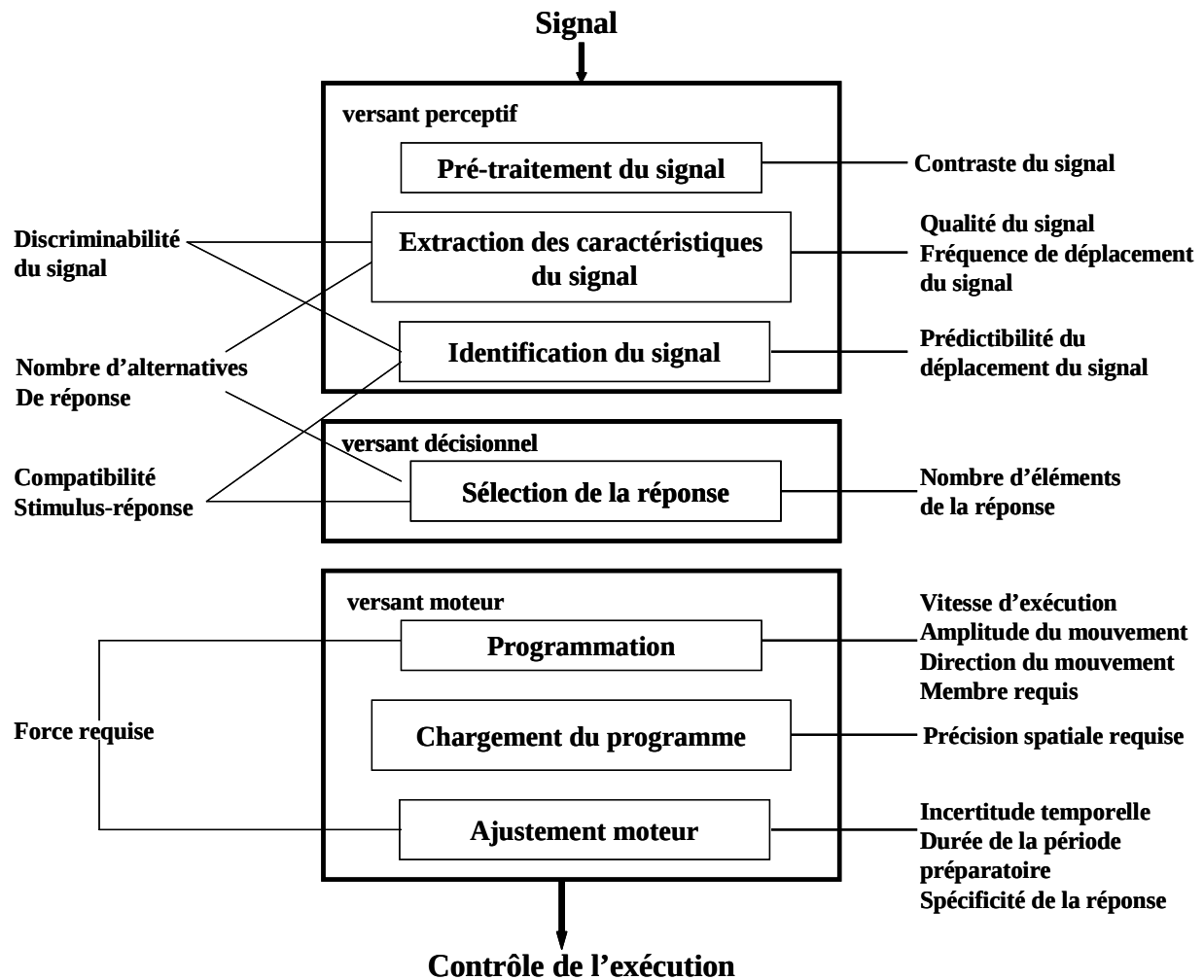


Figure II-5: Modèle sériel de traitement de l'information de Sanders (1990) adapté par Temprado (1994).

3.1.2.3. Stade moteur

Ce stade commence juste après que la décision de l'acte moteur à accomplir soit prise. Il s'agit d'organiser le système de sortie en programmant les différents paramètres du mouvement en fonction de ses caractéristiques mécaniques (amplitude, direction, vitesse d'exécution, membre requis). Ce programme est par la suite chargé sous l'influence de la précision spatiale requise pour le geste. La dernière étape consiste à un ajustement moteur en fonction de la spécificité de la tâche.

On attribut à Henry et Rogers (1960) la mise en évidence de ce stade de traitement. Ils ont testé les effets de la complexité de la tâche sur le TR. Les sujets devaient répondre le plus rapidement possible à l'apparition d'un stimulus visuel par trois différents mouvements. Le premier mouvement (a) consistait à lever le doigt d'un bouton. Le deuxième (b) comportait un mouvement additif au premier et consistait à attraper une balle située à 30 cm au dessus

d'une table. Et le troisième (c) consistait à un enchaînement de mouvements : lever le doigt - toucher la balle suspendue - presser à nouveau le bouton - frapper une autre balle suspendue. De façon à ne pas affecter les stades décisionnel et perceptif, le type de mouvement à exécuter était indiqué avant chaque essai et le signal était identique entre les conditions. Ils ont montré que le TR augmentait de 36 et 49 ms respectivement entre (a) et (b), et entre (a) et (c). Ils ont conclu que la complexité de la tâche augmentait le TR, et ceci au niveau de l'étape de la programmation du mouvement.

3.2. Le paradigme Prédicatif / Réactif

Ce paradigme est né suite à la distinction fonctionnelle entre deux niveaux de traitement de l'information par le système nerveux, l'un sensori-moteur, l'autre cognitif (Paillard, 1990) (figure II-6). Ces deux niveaux correspondent aux deux formes de dialogue qu'entretiennent l'organisme et l'environnement : L'un direct qui relie les informations sensorielles aux activités motrices qui les suscitent et les transforment, soit sous une forme de réactivité directe des instruments sensori-moteurs aux stimulations externes, soit sous forme de boucles moto-sensorielles. Ce compartiment dispose d'un processeur adaptatif autonome, capable d'ajuster automatiquement les circuits sensori-moteurs aux contraintes et aux demandes de l'environnement externe et du milieu intérieur sans faire appel aux processus attentionnels. Le deuxième niveau entretient un dialogue indirect avec l'environnement, il alimente la relation que l'appareil cognitif entretient avec la représentation de l'environnement qu'il a constitué dans ses mémoires représentationnelles. Deux sorties sont envisagées : l'une gérant la motricité (action) par l'intermédiaire des instruments sensori-moteurs et à travers les schémas moteurs résultant des apprentissages et inscrit dans les mémoires « dispositionnelles ». Elle est sous le contrôle des processus intentionnels de sélection. L'autre sortie débouche sur les évocations imagées de l'activité mentale dans l'expérience consciente. Ce compartiment reçoit des informations qui sont filtrées par les étages sensori-moteurs et par les schémas perceptifs, sous le contrôle des processus attentionnels.

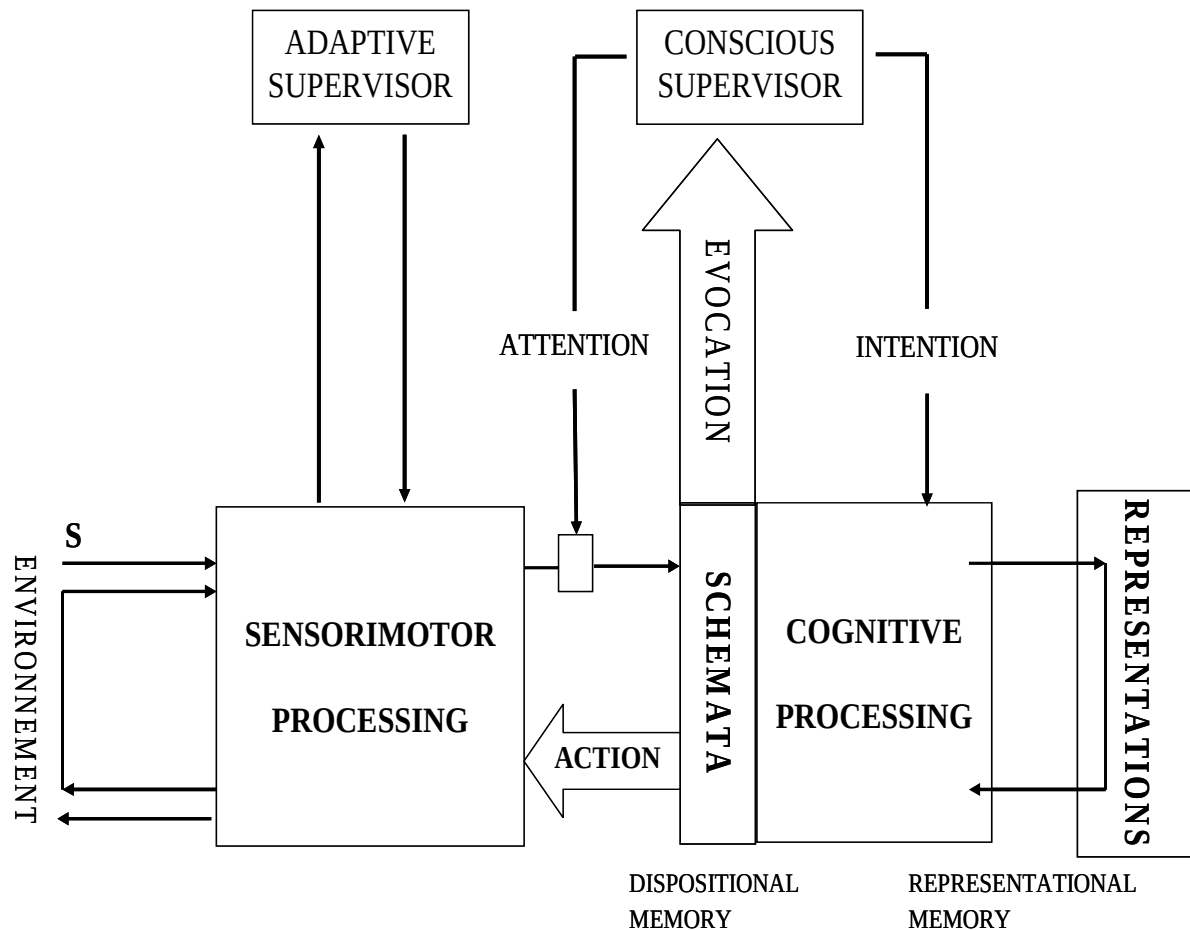


Figure II-6 : Les deux modalités de traitement de l'information (D'après Paillard, 1985).

La présence de ces deux modes de gestion de la motricité pose le problème des interactions qui s'établissent entre eux. Les dialogues sensori-moteurs représentent la source essentielle d'enrichissement d'une représentation interne abstraite du réel sensible dans les mémoires de l'appareil cognitif. Les structures sensori-motrices jouent un rôle d'interface, d'une part, entre les réalités physiques de l'environnement et les modèles internes constitués par les activités cognitives, d'autre part, entre les projets d'action élaborés cognitivement et les productions motrices qui les expriment dans le monde physique (Paillard, 1985). Le compartiment cognitif devient l'instrument d'anticipation, de prévision, de décision et de contrôle qui confère à l'organisme ses capacités autonomes d'action et d'intervention sur le monde, et d'enrichissement du dialogue sensori-moteur qu'il entretient avec lui. Le contrôle exercé par la cognition sur la programmation des activités comportementales ne peut s'exprimer qu'à travers les logiques câblées des modules d'exécution.

On doit à Allen et Tsukahara (1974) la première distinction entre ces deux modes de gestion. Leur modèle largement diffusé, a été revu et modifié par Paillard (1982) (figure II-10). Grâce aux données pathologiques, Paillard a montré une véritable dissociation entre motricité réactive et prédictive. La première (réactive) dépend d'une organisation sensori-motrice, et la seconde (prédictive) permet de construire sa propre motricité sur la base d'un projet d'action. C'est une organisation idéomotrice (Paillard, 1994). Dans l'apraxie idéomotrice, la mémoire du geste est intacte, alors que sa mobilisation sur demande reste impossible. L'exemple souvent cité est celui du salut militaire. Le soldat ne parvient pas à effectuer le salut militaire si on lui en donne l'ordre, alors qu'il demeure capable de l'exécuter automatiquement lorsqu'un gradé entre dans la pièce. On voit bien que la mobilisation des moyens pour réaliser ce mouvement est atteinte.

Paillard, Bard et Fleury (1989) ont montré, au niveau comportemental, des différences entre les modes prédictif et réactif en testant la précision du système moteur dans l'exécution simultanée de mouvements selon deux modalités. En condition réactive, les sujets devaient répondre le plus rapidement et le plus simultanément possible par une extension ipsilatérale de l'index et du talon. En condition prédictive, les sujets devaient, eux-mêmes, initier simultanément l'extension du doigt et du talon ipsilatéral. Ils ont comparé : l'écart des réponses mécaniques (ΔR) des extensions du doigt et du talon ; et de la bouffée d'activité EMG (ΔEMG). Un écart positif indique que l'extension du doigt précède l'extension du talon et inversement pour un écart négatif. Les résultats ont montré qu'en mode réactif, la main précède le talon ; par contre, le talon précède le doigt en mode prédictif (figure II-7).

Selon ces auteurs, en mode réactif, la précession du doigt reflète la différence dans les temps de conduction des voies efférentes, comme si les deux commandes étaient lancées simultanément par le cortex moteur. La précession des commandes correspond à la distance cortico-motoneuronale respective des différents muscles sollicités. Inversement, dans la condition prédictive les sujets montrent cette fois une précession du talon sur le doigt, comme si l'objectif temporel utilisé pour la synchronisation de l'initiation des deux commandes motrices était le retour synchrone au cortex de l'information afférente générée par l'initiation de chacun des mouvements (figure II-8). Dans une autre étude, Larue (2007) avait observé une certaine proportionnalité entre la taille des sujets et le décalage des commandes motrices d'un mode à l'autre.

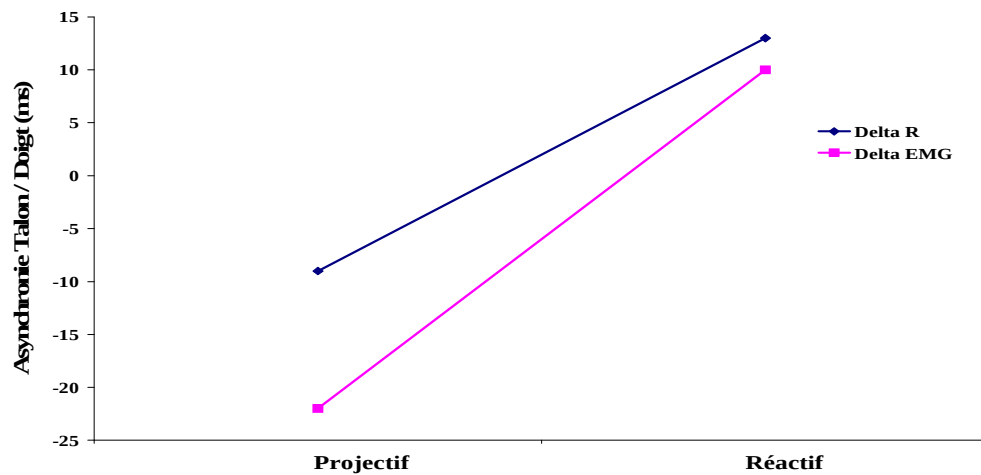


Figure II-7 : Asynchronie Talon/doigt chez des sujets normaux en condition projective et en condition réactive, d'après Bard et al., (1992).

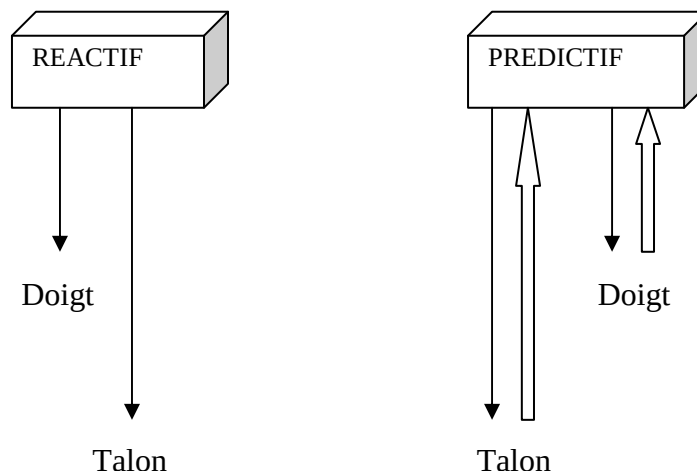


Figure II-8 : Modèle de contrôle des mouvements exécutés en mode réactif et en mode prédictif. Les flèches pleines indiquent l'efférence, les flèches vides indiquent l'afférence. D'après Bard et al. (1992).

Pour confirmer l'implication des afférences dans la synchronisation de la commande motrice, on a testé, avec des sujets normaux, une patiente déafférentée (Bard, Paillard, Lajoie, Fleury, Teasdale, Forget & Lamarre, 1992). Dans les deux conditions, la patiente montre une précession du doigt sur le talon, c'est-à-dire qu'elle se comporte à l'inverse des sujets normaux dans la condition prédictive (figure II-9). Ceci renforce donc l'idée qu'en condition prédictive les sujets utilisent le retour synchronisé de l'information afférente. Ces résultats suggèrent que les réponses réactives et prédictives sont produites par différents modes de

contrôle et que l'information afférente contribue à la synchronisation des commandes motrices en condition prédictive.

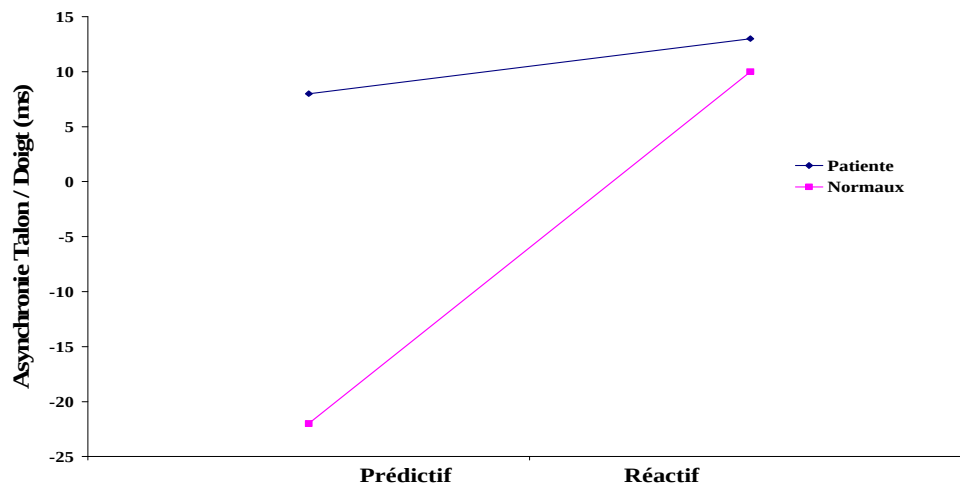


Figure II-9 : Asynchronie de l'EMG Talon/Doigt chez des sujets normaux et chez la patiente déafférentée en condition prédictive et en condition réactive. D'après Bard et al., (1992)

3.2.1. L'élaboration de la commande motrice en modes réactif et prédictif

Il est intéressant et utile de comparer ces données comportementales aux modèles neurologiques de la commande motrice. Ce travail a déjà été initié par Paillard (1982, 1985, 1994). La figure II-10 montre le schéma anatomo-fonctionnel proposé par Paillard (1982), il est structuré en deux secteurs. Sur la gauche, on trouve l'initialisation intentionnelle de l'action, avec les opérations d'intention, de planification et de programmation du mouvement. Sur la droite, le niveau pré-moteur semble jouer un rôle d'interface entre des opérations de planification du niveau supérieur et les opérations d'exécution du niveau inférieur.

Sur la première partie, ce sont les boucles striaires (ganglions de la base) qui interviennent, elles sont impliquées dans l'organisation cognitive de l'action. Plusieurs structures interviennent dans cette boucle : Les formations thalamiques et les aires associatives corticales, d'une part, et les formations limbiques d'autre part, interviennent dans la gestion intentionnelle de l'action (INTEND). Cette boucle permet le contrôle en mode prédictif. Elle emprunte principalement les aires pré-motrices 6 supérieures (dorsomédianes) et l'aire motrice supplémentaire. Ces dernières sont principalement afférentées par le cortex associatif pariétal supérieur (aire5). La lésion de ces parties chez le singe (Moll & Kupers,

1979 : cité par Paillard, 1994) a révélé l'incapacité de ce dernier à adopter la stratégie de détour pour atteindre une cible appétée au travers d'une cloison transparente. Le singe aboutit à une série de collisions avec la cloison. Les auteurs interprétaient cette dernière comme la libération d'une réactivité directe à la vision de la cible convoitée.

Sur la deuxième partie, ce sont les boucles cérébelleuses qui interviennent, elles sont essentiellement réactives et permettent la programmation des paramètres du mouvement (Paillard, 1994 ; Collet, 2002). Ces boucles concernent le cortex pré-moteur ventrolatéral (aire 6 inférieure), l'aire pré-arquée et la partie latérale du cervelet. Elles sont afférentées par le cortex associatif pariétal postérieur (aire 7) en recevant des informations visuelles et somesthésiques. Deux autres boucles impliquant le cervelet intermédiaire assistent le mouvement en cours d'exécution, sur la base de la comparaison entre une copie de la commande motrice (copie d'efférence) et sa réalisation effective. La première se ferme sur le cortex moteur (contrôle d'un mouvement acquis par apprentissage) et la seconde sur le tronc cérébral (contrôle de l'exécution d'un programme moteur primaire) (Collet, 2002). La figure II-11 (Goldberg, 1984) montre les deux voies d'accès au cortex moteur pour la médiation des gestions prédictives et réactives de l'action.

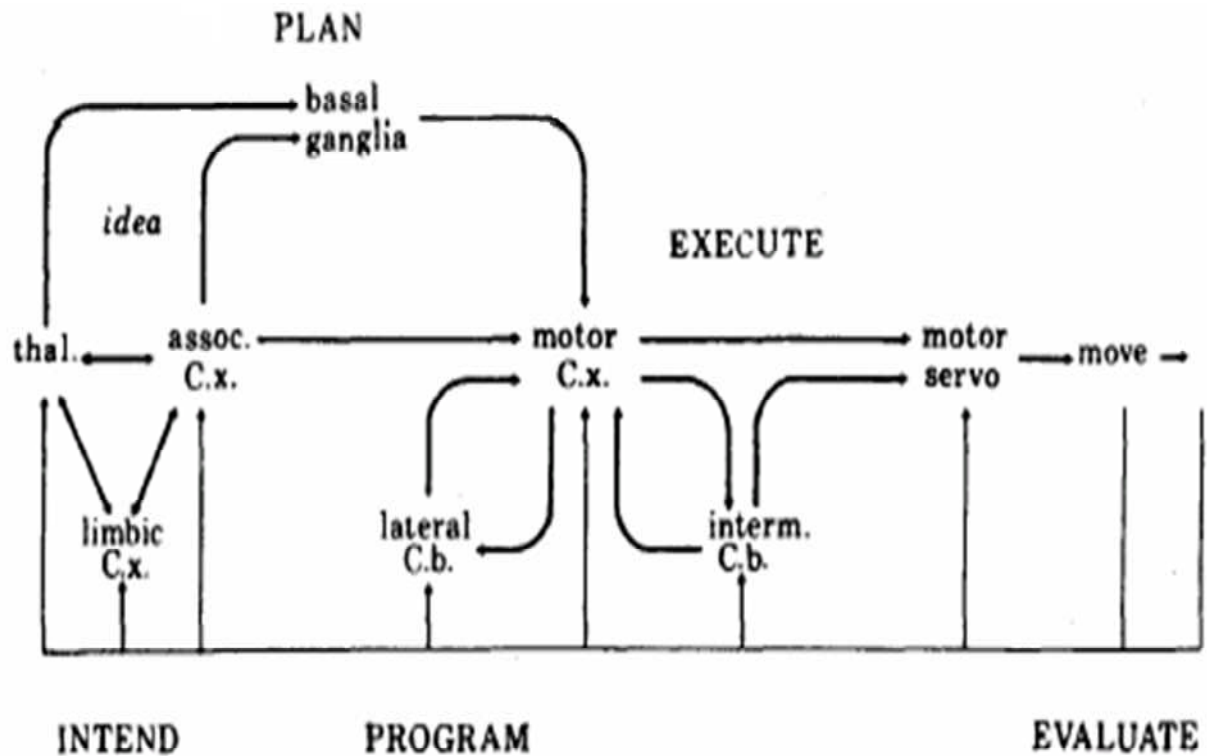


Figure II-10 : Schéma d'organisation des commandes motrices d'Allen et Tsukahara (1974), revu et modifié par Paillard (1982). Voir l'explication dans le texte. C.x. = cortex, C.b. = cervelet.

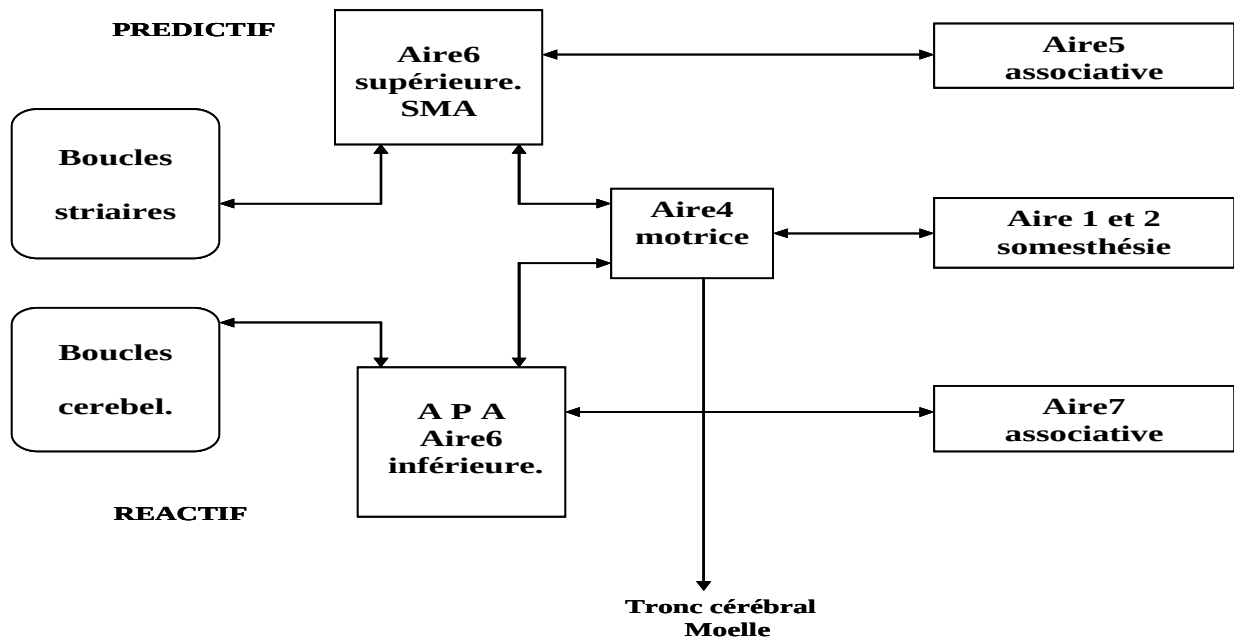


Figure II-11 : Les deux voies d'accès au cortex moteur pour la médiation des gestions projective et réactive de l'action d'après Goldberg (1984). Voir l'explication dans le texte.

3.3. L'anticipation-coïncidence

Plusieurs de nos actions motrices doivent être exécutées en synchronisation spatiale et temporelle avec un objet en mouvement, tel qu'attraper, atteindre, frapper, projeter ou esquiver ; ces actions impliquent souvent de l'anticipation de façon à ce que le mouvement désiré coïncide avec l'objet en déplacement, on parle alors de l'anticipation-coïncidence. Ces actions sont abondantes dans les activités sportives, surtout de balle, lorsqu'un joueur veut intercepter ou frapper un ballon en mouvement. La performance dépend (1) de la capacité à percevoir les caractéristiques de la trajectoire de l'objet à intercepter, afin de faire un jugement précis de l'endroit et du moment de l'arrivée de l'objet et (2) de la capacité à sélectionner, planifier et exécuter le mouvement approprié (Tresilian, 1995).

Les études impliquant les tâches d'anticipation-coïncidence menées en laboratoire s'intéressent principalement à deux types d'erreurs : l'erreur spatiale et l'erreur temporelle. Ces variables sont par la suite mesurées à partir des différentes caractéristiques des sujets : l'expertise, l'âge (Bard, Fleury, Gagnon, Michaud, Teasdale & Proteau, 1995 ; Benguigui & Ripoll, 1998 ; Benguigui, Broderick & Ripoll, 2004) ; de la tâche : intercepter, lancer (Bard *et al.*, 1995 ; Lacquaniti, Maioli, 1989a,b) ; et des fluctuations de l'environnement : vitesse, taille, durée d'exposition du mobile (Fleury, Basset, Bard, Teasdale, 1998 ; Tresilian & Plooy, 2006 ; Marinovic, Plooy & Tresilian, 2008).

Les effets de la contrainte temporelle sur le mouvement dans cette situation concernent principalement les caractéristiques du mobile. Ainsi, il a été montré que lorsque la vitesse du mobile est lente, les sujets ont tendance à déclencher leur mouvement en avance par rapport au mobile, inversement, lorsque la vitesse du mobile est rapide, les réponses surviennent tardivement (Gagnon, Bard, Fleury, & Michaud, 1991). Shea *et al.* (1981) ont montré que lorsque la vitesse du mobile est connue à l'avance, l'augmentation de la vitesse diminue l'erreur de synchronisation, par contre les erreurs augmentent proportionnellement avec la vitesse lorsque celle-ci n'est pas connue à l'avance. Cependant, la variation de la vitesse du mobile induit une diminution de la durée d'exposition puisque la distance parcourue est constante. Ultérieurement, Shea et Northam (1982) ont manipulé la vitesse et la durée d'exposition du stimulus. Ils ont montré que les caractéristiques de la réponse et les erreurs de synchronisation dépendent essentiellement de la durée du stimulus. Néanmoins, ces résultats n'ont pas été répliqués par l'étude de Fleury *et al.* (1998) qui ont montré que la modification

des performances dépendent plus de la vitesse du mobile que de sa durée d'exposition ou de sa distance parcourut. Dans cette étude, Fleury *et al.* (1998) voulaient clarifier les effets de la durée de présentation du stimulus, de l'espace couvert par celui-ci et du contexte de présentation (constant ou varié) des vitesses sur la performance d'interception d'un mouvement apparent animé d'une vitesse lente ou d'une vitesse rapide. L'interception se faisait à l'aide du lancer glissé d'une rondelle sur une table. La combinaison de ces paramètres a donné lieu à six conditions expérimentales. Leurs résultats ont montré que la vitesse du stimulus influence (a) le biais, c'est-à-dire l'erreur temporelle constante observée dans le comportement d'interception, (b) la programmation de ce comportement et (c) la stratégie de réponse adoptée par les participants (temps d'initiation du mouvement, le temps de mouvement, ainsi que la durée de trajectoire du disque). En revanche, ni la durée de présentation du stimulus, ni la distance que celui-ci parcourt, n'altère le lien étroit entre la vitesse du stimulus et le biais temporel dans une tâche complexe d'interception. Ces résultats en apparence contradictoires ont été expliqués par Fleury *et al.* (1998) par la différence dans les tâches expérimentales. Ils ont supposé que la durée d'exposition du mobile peut influencer des mouvements simples tels que presser sur un bouton ou exécuter un mouvement impliquant un seul degré de liberté, tandis-que la vitesse influencerait les mouvements complexes impliquant plusieurs articulations. Il semble qu'un échantillon des caractéristiques du mobile pris sur une fenêtre temporelle, indépendamment de sa durée, est utilisé pour l'exécution de mouvements complexes.

Les différences dans les performances en fonction de la vitesse du mobile peuvent être expliquées selon l'approche cognitive comme étant des différences dans le processus du traitement de l'information fournie par le stimulus, car les différentes vitesses impliqueraient différents types d'encodages. Cependant, les résultats de Shea *et al.* (1981) ont montré que les performances ne suivent pas la loi de Fitts (1954), c'est-à-dire que les erreurs de synchronisation diminuent (amélioration des performances) avec l'augmentation de l'indice de difficulté (vitesse du mobile). Cette discordance avec la loi de Fitts (1954) peut être le résultat des processus attentionnels qui influenceraient la vitesse de traitement de l'information (Posner, 1978). Une vitesse rapide du mobile exciterait davantage les processus attentionnels ce qui améliorerait les performances en général.

Récemment, Tresilian (2005) avait proposé un modèle représentant les différents processus impliquant les mouvements rapides d'interception (figure II-12). D'abord un

programme moteur particulier correspondant au type d'interception à produire est sélectionné. Les différentes informations données au préalable peuvent être utilisées pour préparer les paramètres du mouvement. Ces paramètres peuvent être modifiés ou réglés avec précision lorsque les informations deviennent disponibles. A cet égard, les informations les plus importantes sont dérivées des observations visuelles de la cible en mouvement. Ces informations peuvent être utiles seulement si elles sont disponibles avant le début de la génération des commandes. Ce moment survient lorsqu'un critère, correspondant au moment où le mobile arrive à un point choisi à l'avance pour déclencher la réponse (*temps critique avant contact* : TTC_{crit}), est atteint. L'intervalle entre le moment de percevoir le mobile et le TTC_{crit} est appelé stade final de la préparation motrice. Ce stade est crucial, car c'est la période durant laquelle les informations concernant le mobile peuvent être utilisées pour déterminer le mouvement. Lorsque le temps avant le contact (tc) est égal à TTC_{crit} , il existe un temps correspondant à un TR précédent le mouvement. Ce TR implique un temps pour la transmission des informations perceptives (visuelles) et le déclenchement du programme moteur, et une autre période nécessaire pour la transmission de ce programme moteur aux muscles. Ce type de TR est appelé le délai visuo-moteur.

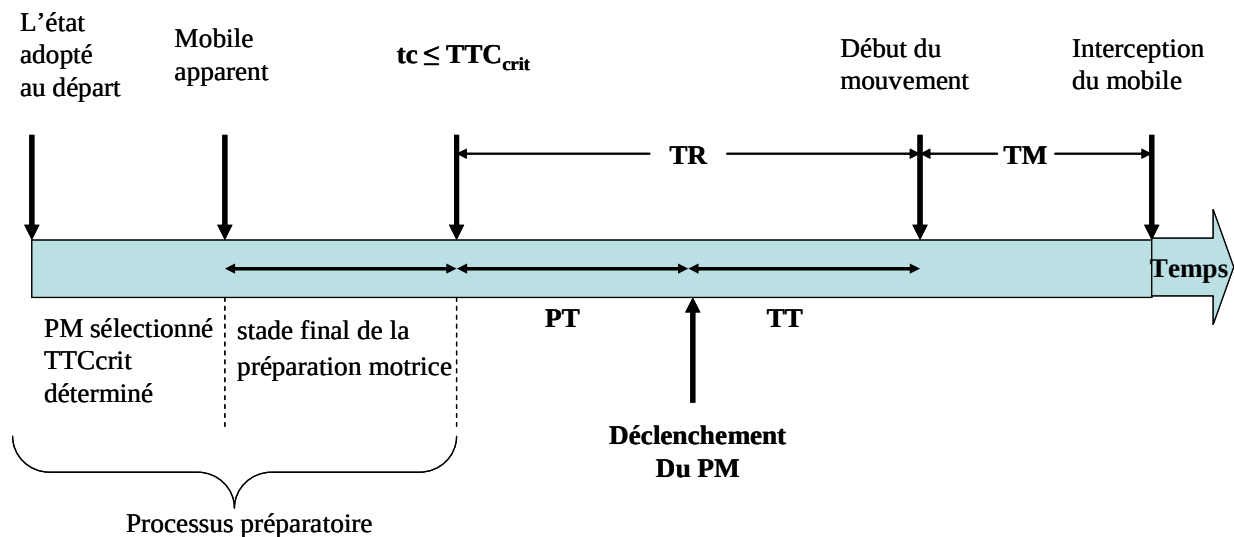


Figure II-12: Séquences temporelles des événements dans une tâche d'interception d'un mobile d'après Trésilian (2005). Ces séquences sont expliquées dans le texte. TTC_{crit} : temps critique avant contact ; tc : temps avant contact ; PT : temps de transmission perceptuel ; TT : temps de transmission du programme moteur (PM) ; TM : temps de mouvement ; TR : temps de réaction.

3.3.1. Anticipation-coïncidence et la variable tau (τ)

La vision joue un rôle primordial dans les tâches d'anticipation-coïncidence. La théorie écologique stipule que l'utilisation des informations optiques n'implique pas un traitement cognitif puisque le flux optique peut déterminer nos réponses motrices sans analyse perceptive selon le principe *perception-action* (Gibson, 1979). Les précurseurs de l'approche écologique (Lee, 1976) ont suggéré l'existence d'une variable *tau* (τ) qui représente l'expansion rétinienne par rapport à un objet en déplacement à un instant T. Les variations de τ en fonction du temps $\dot{\tau}$ sont principalement utilisées pour calculer le temps avant le contact (t_c) dans les tâches d'anticipation-coïncidence.

Toutefois, plusieurs expériences ont montrées que τ pouvait être associé à d'autres paramètres pour l'estimation du t_c , ou qu'il pouvait tout simplement ne pas être utilisé pour certaines tâches. Par conséquent, le SNC utilise un certain nombre d'indices perceptifs et cognitifs pour estimer t_c (Lacquaniti & Maioli, 1989 ; Wann, 1996 ; Tresilian, 1995, 1999 ; Oudejeans, Michaels, Bakker & Davids, 1999). D'ailleurs, Tresilian (1995) avait proposé de réviser la théorie de Lee (1976) afin de prendre en compte : (1) les différentes variables optiques disponibles pour estimer le t_c , (2) les processus cognitifs pouvant intervenir dans cette situation et enfin (3) les différentes entrées sensorielles dont dispose le SNC et dont il peut tirer profit pour faire cette estimation. Cela paraît assez logique dans la mesure où de nombreux travaux ont montré qu'un système sensoriel défaillant, ou endommagé, peut être remplacé temporairement, ou définitivement, par un autre pour que le SNC puisse continuer à gérer le mouvement. On peut citer le cas où les informations visuelles sont utilisées en remplacement des informations proprioceptives chez les sujets déafférentés (Blouin, Teasdale, Paillard, Fleury, Forget & Lamarre, 1993 ; Fleury, Macar, Bard, Teasdale, Paillard, Forget & Lamarre, 1994 ; LaRue, Bard, Teasdale, Paillard, Forget & Lamarre, 1995).

3.4. Paradigme Stop et processus d'inhibition

L'inhibition d'un mouvement volontaire se manifeste par l'absence d'un comportement moteur attendu. Par conséquent, les variables qui sont utilisées dans le domaine de la psychologie expérimentale restent inaccessibles. Cependant, la comparaison entre les conditions d'inhibition et de non inhibition permet, en quelque sorte, d'explorer cette face cachée du contrôle moteur. L'absence de l'acte moteur a mené également les chercheurs à explorer les mécanismes centraux régissant le processus d'inhibition.

Logan et Cowan (1984) ont examiné l'inhibition de la réponse en utilisant le paradigme Stop (cf. Lappin & Eriksen, 1966; Logan, 1994). Dans ce paradigme, une tâche de temps de réaction est occasionnellement interrompue par un signal stop (SS) qui apparaît à des délais variables par rapport au signal de réponse. La consigne est de répondre à tous les essais le plus rapidement possible, mais d'essayer de stopper la réponse qui est en préparation lorsque le signal stop survient. Bien que plusieurs auteurs (Lappin & Eriksen, 1966; Logan, 1981; Osman, Kornblum, & Meyer, 1986; Vince, 1948) ont suggéré une sorte de course entre le processus stop et le processus de réponse, le premier modèle de « course » (de l'anglais « horse-race-model ») permettant l'interprétation des résultats issus du paradigme stop fut développé par Logan et Cowan (1984, figure II-13). Le modèle suppose simplement que le moment d'apparition du signal stop représente le début du processus d'inhibition. Ce processus est engagé dans une course contre le processus de réponse qui est encore en préparation. Bien qu'il existe des controverses concernant le lieu où cette course se termine (De Jong, Coles, Logan, & Gratton, 1990; Osman *et al.*, 1986; 1990), l'idée générale est que le processus qui se termine en premier détermine si la réponse sera interrompue ou non. Le postulat de l'indépendance de ces deux processus implique que (1) les durées des processus Go et Stop ne sont pas corrélées, et (2) que le processus Go a toujours les mêmes propriétés, sans se soucier de la présentation ou non du signal stop. Le modèle fournit une méthode pour estimer le temps de réaction au signal stop (TRSS).

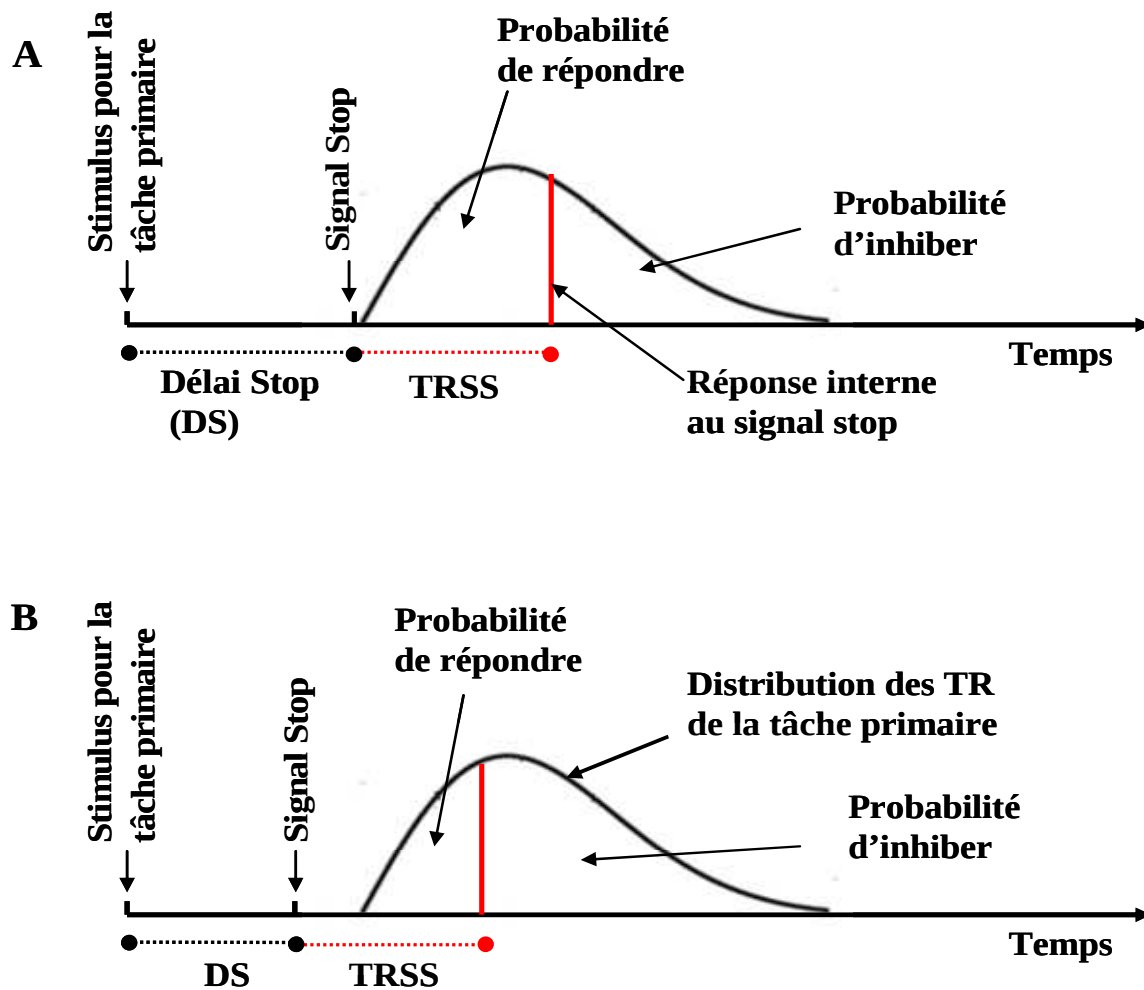


Figure II-13 : Présentation graphique du modèle de course « horse-race-model ». Le modèle explique comment la probabilité d'inhiber une réponse et la probabilité de répondre à la tâche primaire dépendent de la distribution des temps de réaction à la tâche primaire, au temps de réaction au signal stop (TRSS), et au délai stop (DS). Lorsque le DS est proche du temps de réaction (partie A), la probabilité d'inhiber la réponse à la tâche primaire diminue. Inversement, lorsque le DS est proche du signal de la tâche primaire (partie B), la probabilité d'inhiber celle-ci est grande. Figure adaptée à partir des travaux de Logan et Cowan (1984), et Verbruggen et Logan (in press).

Le TRSS représente la différence entre le début et la fin du processus stop (Logan, 1981). Le début de ce processus est connu par la valeur du délai stop, mais la fin du processus doit être estimée à partir des TR des essais non inhibés. Si on considère que la vitesse

d'inhibition est constante, donc la fin du processus stop est également constante pour un délai stop donné. Le taux de réponse représente alors la proportion des processus Go qui se terminent avant le TRSS. Cela implique que le temps nécessaire au processus stop soit égal au $X^{\text{ième}}$ percentile de la distribution des scores des TR, dans laquelle X est le taux de réponse. Ainsi, le TRSS peut être calculé pour chaque délai stop par la soustraction de ce délai du score du $X^{\text{ième}}$ percentile (Logan, 1981; Logan & Cowan, 1984). La valeur du TRSS est relativement constante autour de 200ms chez les jeunes adultes, mais augmente considérablement chez les petits et les personnes âgées. Cependant, ces valeurs s'améliorent et se déclinent indépendamment du TR (van den Wildenberg & van der Molen, 2004 ; Rush, Barch & Braver, 2006).

En plus du TRSS, le modèle de « course » fournit d'autres mesures très intéressantes. La fonction d'inhibition montre comment le taux de réponse est relié aux délais stop. Cette relation suit une fonction sigmoïde, c'est-à-dire que la pente de la fonction est petite autour de 0 et de 100% d'inhibition, tandis qu'elle est abrupte autour des délais intermédiaires. Si on ignore les extrémités et on prend en considération seulement les délais permettant une inhibition entre 15 et 85%, la fonction est presque linéaire. Cependant, le choix des délais stop semble être un paramètre important pour une meilleure distribution de la fonction d'inhibition.

3.4.1. Ajustement des délais stop

Le paradigme stop présente l'avantage de permettre la manipulation du temps de distribution des stimuli d'inhibition. Par conséquent, la fin du processus d'inhibition en course contre le processus Go peut être déplacée aux latences qui sont les plus intéressantes pour l'estimation de la fonction d'inhibition. Ce n'est pas plus informatif d'allonger les mesures pour la fonction d'inhibition en dehors de la fourchette de taux de réponse de 15 et 85% (Bend, van der Molen & Logan, 2003). La sélection des Délais Stop (DS) doit être essentiellement basée sur ces considérations. Cependant, les DS doivent également être sélectionnés en prenant en compte la stratégie des sujets. Si le signal stop est toujours présenté après 50ms, il est suffisant pour les sujets d'attendre les premières 60 ms dans le but d'atteindre le meilleur score d'inhibition (Lappin & Eriksen, 1966; Logan, 1981). Pour prévenir une telle stratégie, il faudrait mélanger les DS qui surviennent tôt et ceux qui surviennent tard. La meilleure façon est de faire un ajustement pour le DS lorsque les sujets

augmentent leurs scores. Toutefois, il existe un autre effet d'anticipation, la tendance à retarder les réponses quand le pourcentage des essais avec le signal stop augmente (Logan, 1981; Logan & Burkell, 1986). Dans le but de ne pas affecter la vitesse de la tâche primaire, un taux de 25% des essais stop est recommandé (Logan, 1994; Logan & Burkell, 1986). Malheureusement, cela restreint le nombre moyen d'essais pouvant raisonnablement être présenté par condition et par session expérimentale.

Dans les études antérieures du paradigme stop, les DS étaient sélectionnés comme constants, sur la fourchette de 0 à TR (ex. Lappin & Eriksen, 1966; Logan & Burkell, 1986). Cette procédure a l'avantage d'être facile à implémenter sur l'ordinateur. Cependant, les DS doivent être ajustés en fonction des différences individuelles dans les TR et les TRSS. Les effets de stratégies constituent un autre problème car les sujets peuvent anticiper l'apparition du signal stop. Par exemple, si on combine les DS tôt puis tard, les sujets peuvent choisir d'attendre l'occurrence du signal qui apparaît tôt, mais de risquer l'occurrence du signal stop qui apparaît tard.

On peut aussi utiliser une *procédure adaptative* pour déterminer les DS. Ainsi, les DS sont ajustés pour des changements momentanés des TR (ex. Logan & Cowan, 1984; Schachar & Logan, 1990). Par exemple, Chachar et Logan (1990) déterminaient la moyenne des TR après chaque bloc d'essais, et par la suite présentaient les signaux stop sur des DS de TR-500ms, TR-400ms, TR-300, TR-200, TR-100 ms et TR-0 ms. L'avantage de cette procédure de poursuite du TR (« RT-Tracking ») et que les différences individuelles dans les TR, aussi bien que la stratégie d'hésitation dans l'anticipation du signal stop sont compensées. Schachar et Logan ont affiché la probabilité d'inhibition comme une fonction du TR-DS, et ils ont trouvé que cette fonction parcourt une fourchette approximative de 70% à 20% d'inhibition pour tous les groupes d'âges entre 7 ans et l'âge adulte.

3.4.2. Mécanismes centraux d'inhibition

Les études de neurophysiologie s'accordent sur le rôle principal joué par le lobe frontal et le cortex associatif dans l'inhibition du mouvement (Pfefferbaum, Ford, Weller & Kopell, 1985; Gemba & Sasaki, 1989; Sasaki et al., 1989, 1993, 1996; Roberts, Rau, Lutzenberger & Birbaumer, 1994; Filipovic, Jahanshahi & Rothwell 2000; Watanabe, Sugiura, Sato K., Sato Y., Maeda, Matsue, Fukuda & Kawashima, 2002). Des études encore plus récentes attribuent ce rôle au cortex frontal inférieur (CFI) (Aron & Poldrack, 2006 ;

Pliszka, Glahn, Semrud-Clikeman, Franklin, Perez, Xiong & Liotti, 2006 ; Chevrier, Noseworthy & Schachar, 2007). Selon Verbruggen et Logan (2008), le CFI bloque l'exécution de la réponse Go par l'intermédiaire des ganglions de la base. Les patients atteints au niveau des ganglions de la base et spécialement au noyau subthalamique, trouvent des difficultés à inhiber leurs mouvements (van den Wildenberg, van Boxtel, van der Molen, Bosch, Speelman & Brunia 2006). Aron et al. (2007) ont montré qu'il existe une voie directe reliant le CFI et le noyau subthalamique, qui à leurs tours sont reliés à l'aire motrice pré-supplémentaire (préSMA). Selon ces auteurs, la préSMA est impliquée dans le contrôle ou dans la résolution du conflit d'activation et d'inhibition de la réponse. Cependant, même si l'ensemble de ces études convergent vers l'implication du circuit fronto-ganglions de la base dans l'inhibition, la faible résolution temporelle en IRMf laisse le débat ouvert sur le rôle exacte de chacune des régions composant ce circuit.

Si la source de l'inhibition est vraisemblablement connue, il semble important de déterminer à quel niveau l'inhibition de la réponse se produit. De Jong *et al.* (1990, 1995) ont proposé au moins deux niveaux. Un niveau qui opère en amont du cortex moteur, permettant d'inhiber les processus centraux d'activation. Ce mécanisme est montré par les faibles amplitudes du potentiel latéral évoqué dans les essais inhibés (De Jong *et al.*, 1990, 1995). Un deuxième mécanisme qui opère en aval par rapport au cortex moteur primaire, permettant d'inhiber la transmission des commandes motrices aux structures périphériques. Ce mécanisme a été montré suite à l'inhibition de mouvements induits par une stimulation magnétique transcrânienne (Hoshiyama, Kakigi, Koyama, Takeshima, Watanabe & Shimojo, 1997), montrant ainsi une possibilité d'inhibition intervenant sur les voies pyramidales. Ces résultats supposent que l'inhibition de la réponse peut survenir à différents niveaux, et cela dépend probablement de la contrainte temporelle (Délais stop). Mais il existe un point de non retour où la réponse ne peut plus être inhibée, il correspond au moment où les traitements deviennent balistiques (Bartlett, 1958 ; Osman *et al.*, 1986 ; Band & Boxtel, 1999). Bien que la source peut être la même, le point de non retour représente seulement le dernier site possible de l'inhibition.

3.4.3. *Paradigme stop et tâche d'anticipation-coïncidence*

Dans le paradigme stop les sujets sont généralement engagés dans une tâche primaire de temps de réaction simple, où ils devraient répondre le plus rapidement possible à un signal

impératif. Toutefois, peu d'études ont utilisé une tâche primaire où le moment d'apparition du stimulus de déclenchement du mouvement est prévisible, comme c'est le cas dans une tâche d'anticipation-coïncidence. Par exemple, Slater Hammel (1960) demandait à ces sujets de lever le doigt lorsque l'aiguille d'un chronomètre atteignait la graduation zéro (stimulus). Sur certains essais, l'aiguille s'arrêtait quelques millisecondes avant le stimulus. Lorsque le signal d'arrêt survient 200 ms avant le passage à zéro de l'aiguille, les sujets atteignaient presque 100% d'inhibition, par contre la performance à l'inhibition tend vers zéro lorsque l'arrêt de l'aiguille survient à 80 ms avant le stimulus. Comme dans les tâches primaires de TRS, les performances à l'inhibition en AC suit également une courbe sigmoïde. Cependant, Slater Hammel s'est intéressé au point de non retour qu'il avait défini comme étant le point où les sujets sont capables d'inhiber 50% des réponses, ce point correspond au point bi-sériel de la courbe sigmoïde. Slater Hammel l'avait estimé à 166 ms pour des mouvements de l'index.

Ce principe a été reproduit par Larue (2007) dans le but de dater l'envoi de deux commandes impliquant deux effecteurs (doigt, talon) devant s'activer simultanément. Larue (2007) avait utilisé trois conditions de soulèvement : doigt seul, talon seul et doigt-talon simultanément, en réponse au passage d'un mobile visuel sur une cible. Pour limiter les stratégies d'anticipation, les essais comportant les DS représentaient seulement 17% du total des essais (comparativement à 37% pour Slater Hammel (1960)). Les résultats ont montré que, dans toutes les conditions, les performances à l'inhibition diminuaient lorsque les DS sont proches du moment de la réponse selon une relation sigmoïde entre les fréquences d'inhibition et les DS. Plus intéressant, les points bi-sériels du doigt et du talon en condition « seul » sont inférieurs à ceux enregistrés en condition « simultanée ». Si le point bi-sériel représente le moment d'envoi des commandes motrices on devrait avoir des valeurs équivalentes entre les conditions seule et simultanée, puisque les délais de conduction sont supposés être stables. Ces différences suggèrent donc que le point de non retour se situe en amont du cortex moteur dans les étapes de traitement de l'information (Larue, 2007). En second lieu, cette étude avait montré que le point bi-sériel du talon survient 26-32 ms en avance par rapport à celui du doigt en condition simultanée. Ce résultat soutient le modèle de Paillard (1990) qui supposait que pour synchroniser le mouvement du doigt et du talon dans la condition prédictive, la commande impliquant le talon est déclenchée en premier en raison de la longueur des voies efférente et afférentes.

Chapitre III : Coordination entre posture et mouvement

Dans ce chapitre nous allons essayer d'établir les liaisons qui existent entre l'exécution d'un mouvement volontaire et les ajustements posturaux qui sont évoqués dans les deux premiers chapitres. Ce lien a été établi pour la première fois par Babinski (1899) qui avait remarqué que le mouvement du tronc est accompagné par un déplacement de la hanche et des genoux dans la direction opposée, ce mécanisme ayant pour résultat de préserver l'équilibre.

Le mouvement est source de déséquilibre postural car il modifie la géométrie du corps ainsi que la position du centre de gravité. Le mouvement implique également une dynamique inter-segmentaire issue des forces de réactions des segments servant d'appui au mouvement. Par conséquent, tout mouvement volontaire implique des ajustements posturaux. Ces ajustements ont été observés en laboratoire sur différentes formes de mouvements : Elévation du membre supérieur (Belenkii *et al.*, 1967 ; Lee, 1980 ; Bouisset & Zattara, 1981, 1987 ; Nougier *et al.* 1999 ; Cuisinier, Olivier & Nougier, 2005), lestage ou délestage d'une charge (Aruin & Latash, 1995 ; Hay & Redon, 1999), flexion du coude (Friedli, Hallett & Simon, 1984 ; Cohen, Hallett, Stanhope & Simon, 1988), flexion ou extension du membre inférieur (Rogers & Pai, 1990 ; Do, Nouillot & Bouisset, 1991 ; Mouchnino, Cincera, Fabre, Assaïante, Amblard, Pedotti & Massion, 1996), poussé ou tirage de poignet (Cordo & Nashner, 1982 ; Brown & Frank, 1987 ; Lee, Michaels & Pai, 1990), la marche (Brenière, Do & Bouisset, 1987).

Comme ces mouvements sont exécutés volontairement, la perturbation posturale est prédictible par le système nerveux central. Par conséquent, deux types d'ajustements sont envisageables, des ajustements qui anticipent les effets de la perturbation provoquée par le mouvement à venir (APAs) et des ajustements en réaction à cette perturbation (ARs). Ces deux types d'ajustements se différencient par leur mode de déclenchement. Les APAs sont déclenchés à l'initiative du sujet par un contrôle proactif ou en boucle ouverte (Forget & Lamarre, 1990 ; Massion, 1992). Tandis-que les ARs sont déclenchés par des boucles de rétroaction sensorielles (Massion, 1992). Le caractère proactif des APAs suppose l'existence de mécanismes permettant une organisation particulière avec le mouvement volontaire. L'étude de ces mécanismes s'est développée depuis les résultats pionniers de Belenkii *et al.* (1967) portant sur le mouvement d'élévation de bras. Nous allons essayer d'examiner plus en détail comment les APAs sont organisés en fonction des différents facteurs qui caractérisent la

perturbation. Mais il semble intéressant et utile de présenter d'abord les deux modes supposés intervenir dans la coordination entre posture et mouvement.

1. Modes de coordination entre posture et mouvement

Deux modes de coordination entre les APAs et le mouvement focal ont été proposés dans la littérature (Massion, 1992). Dans le premier mode, *hiérarchique*, les APAs et le mouvement focal sont les conséquences d'une seule commande motrice. « *Les voies centrales contrôlant le mouvement émettent des collatérales qui agissent sur le réseau des APAs* » (Massion, 1992). Dans ce mode de coordination le début de l'activité focale et les APAs s'effectue dans le même temps (« Time-locked »). Ce modèle est principalement appuyé par la corrélation qui existe entre l'action motrice et les APAs (Aruin & Latash, 1995a), et par la présence des APAs après une stimulation électrique au niveau du cortex moteur chez les chats (Gahéry & Massion, 1981). Dans le deuxième mode, *parallèle*, on suppose l'existence de deux processus indépendants, l'un contrôlant l'activité focale et l'autre l'activité posturale. Dans ce cas le début de l'activité posturale peut être dissocié du début de l'activité focale. Ce modèle est appuyé par la présence des APAs même en l'absence d'une action motrice (Aruin & Shiratori, 2001)¹. La figure ci-après (III-1) montre le fonctionnement de ces deux modes de coordination. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'il ne s'agit que d'une schématisation.

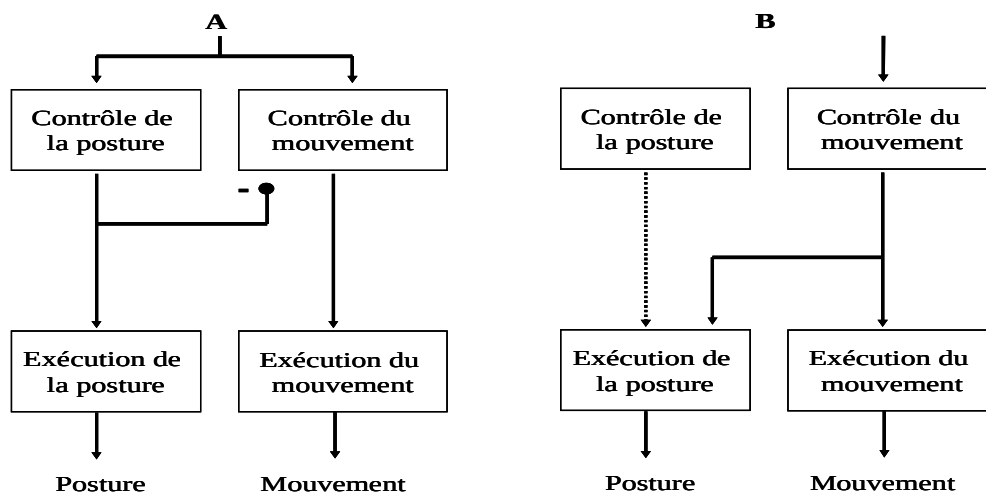


Figure III-1 : Illustration des deux modes de coordination entre posture et mouvement. A : mode parallèle ; B : mode hiérarchique. Le signe – indique que le circuit du mouvement volontaire est inhibé jusqu'à ce que les APAs atteignent une valeur de référence. D'après Massion (1992).

¹ Ces études seront exposées en détail dans l'introduction de l'expérience 3, puisque ces modes seront l'objet principal de l'expérience.

2. Facteurs affectant les ajustements posturaux anticipateurs (APAs)

La génération des APAs est affectée par trois principaux facteurs (Aruin, 2002) : (1) l'action motrice associée à la perturbation, (2) la magnitude et la direction de la perturbation, et (3) les conditions posturales précédant le mouvement.

2.1. APAs et action volontaire

L'organisation des APAs dépend de l'action motrice et particulièrement de la vitesse d'exécution du mouvement à venir (Horak, Esselman, Anderson, Lynch, 1984 ; Lee *et al.*, 1990 ; Mochizuki, Ivanova & Garland, 2004). Zattara et Bouisset (1983) ont montré que les APAs n'apparaissent qu'à partir d'un certain seuil de vitesse, et leur importance croît de façon proportionnelle à la vitesse. Ces résultats ont été confirmés récemment par Bleuse *et al.* (2002) qui ont utilisé une tâche de soulèvement de bras. L'amplitude des APAs augmente avec l'augmentation de la vitesse. En revanche, les APAs disparaissent complètement lorsque le bras est déplacé passivement. D'autres études ont montré des modifications des APAs lorsque la même perturbation est provoquée par différentes actions motrices (Dufossé, Hugon, Massion, 1985; Paulignan, Dufossé, Hugon, Massion, 1989; Aruin & Latash 1995a; Shiratori & Latash, 2001; Aruin, Shiratori, Latash, 2003 ; Shiratori & Aruin, 2007). Par exemple, Aruin et Latash (1995a) ont demandé à des sujets, debout sur une plateforme de force bras tendus à l'horizontale, les paumes des mains se faisant face, de tenir un ballon en le pressant entre leurs mains. Une charge de 2.2 kg était attachée au ballon par une petite corde. La réponse posturale des sujets a été enregistrée en fonction de deux conditions de délestage, chacune provoquée par une action différente. Dans la première action, les sujets relâchaient le ballon en écartant rapidement les bras de part et d'autre du ballon. Dans la seconde condition, les sujets crevaient le ballon en fléchissant le majeur auquel était attachée une aiguille. Les APAs ont été observés dans les deux conditions. Cependant, ces APAs (amplitude EMG et déplacement du CP) étaient plus marqués sur l'action motrice impliquant l'éloignement des bras, même si la perturbation à venir était similaire (Aruin & Latash, 1995a ; Aruin *et al.*, 2003). De plus, les APAs disparaissaient lorsque le lâché de la charge, toujours attachée au ballon gonflable est provoqué par l'expérimentateur. Selon ces auteurs, la génération des APAs est peut-être mieux associée au mouvement lorsque les muscles impliqués dans l'action motrice sont proximaux ou lorsqu'un groupe musculaire plus important est impliqué (abduction de l'épaule). Il est également possible que le mouvement d'abduction, étant plus familier de part les activités quotidiennes, soit associé à une perturbation plus importante que

la simple flexion du doigt (Aruin *et al.*, 2003). Les résultats de ces expériences ont montré que le mouvement volontaire est toujours associé aux APAs et que la magnitude des APAs varie en fonction de l'action motrice induisant la perturbation.

2.2. APAs et magnitude de la perturbation

Les études manipulant la magnitude de la perturbation ont montré que le SNC est capable de fournir des APAs correspondants aux changements de l'amplitude de la perturbation, même si l'action motrice est similaire (Dufossé *et al.*, 1985 ; Paulignan *et al.*, 1989 ; Bouisset & Zattara, 1987, 1990 ; Aruin et Latash, 1995a, 1996). Dans une tâche de soulèvement de bras, la magnitude de la perturbation a été augmentée en augmentant l'inertie (Bouisset & Zattara, 1987, 1990). Ainsi, il a été démontré que les APAs surviennent plus tôt lorsque le soulèvement de bras s'effectue avec une charge additionnelle attachée au poignet. De plus, les APAs augmentent avec l'augmentation de la charge. Dans un autre paradigme, les sujets sont appelés à appliquer des forces verticales variables sur une barre horizontale liée à un moteur transducteur (Aruin & Latash, 1996). Les variations de forces appliquées modifient l'importance de la perturbation lorsque la charge est lâchée. Les sujets libèrent la charge par une abduction des deux épaules de manière auto-initiée. Les résultats ont montré que le timing et l'amplitude des APAs enregistrés sur les muscles de la partie frontale du membre inférieur (biceps femoris, tibialis antérieur) et du tronc (rectus abdominis) sont corrélés positivement avec la magnitude de la perturbation.

De façon à s'assurer que la modulation des APAs liée à la magnitude de la perturbation n'est pas la conséquence de l'action motrice, Shiratori et Latash (2001) ont utilisé une tâche d'interception de charge sans mouvement apparent. Ayant le bras en extension à l'horizontale, les sujets devaient intercepter (recevoir sur la main) une charge lâchée par l'expérimentateur à une hauteur fixe. La magnitude de la perturbation varie en fonction de la force d'impulsion provoquée par l'impact des différentes charges sur la main. Des APAs ont été observés au niveau des membres inférieurs, du tronc et du bras avant l'impact. L'amplitude de ces APAs augmentait avec l'augmentation de la charge à intercepter. Ceci démontre que des APAs peuvent apparaître en l'absence d'une action motrice et que les effets de la magnitude de la perturbation sur les APAs peuvent être indépendants de ceux de l'action motrice.

2.3. APAs et conditions posturales

Les conditions posturales ont été manipulées soit par la modification des appuis au sol (surface d'appui) soit par le changement de la configuration de la géométrie du corps. Dans le premier paradigme, Cordo et Nashner (1982) ainsi que Nardone et Schiepati (1988) ont montré que les APAs sont d'autant plus faibles que les conditions posturales sont très stables. Inversement, Nouillot, Bouisset & Do, (1992, 2000) ont montré une absence d'APAs lorsque la posture initiale est instable. Dans leur récente étude (2000), ces auteurs ont comparé une situation de soulèvement de la jambe droite en position bipodale et en position unipodale (jambe droite légèrement décollée du sol). Les résultats ont montré une large activité des APAs en position bipodale, tandis-que ces APAs sont complètement absents en position unipodale. Les auteurs ont suggéré que les APAs sont eux-mêmes une source de perturbation de l'équilibre et l'absence des APAs dans la condition d'instabilité posturale est peut-être une stratégie de défense de la part du SNC. Suivant un autre protocole, Yiou, Hamaoui et Le Bozec, (2007) ont examiné les effets du changement de la surface d'appui (condition posturale initiale) sur les APAs et sur une tâche de pointage. Ainsi, les déplacements du centre de pression augmentent avec l'augmentation de la surface d'appui (0 à 40 cm). Si le centre de pression est libre de se déplacer sur une plus grande surface lors de la posture initiale alors le centre de pression se déplace davantage durant les APAs. En revanche, ces résultats semblent en contradiction avec l'idée établie selon laquelle l'atténuation ou l'absence d'APAs en position assise serait due à une augmentation du polygone de sustentation (Aruin & Shiratori, 2003). Il semble que des facteurs comme le rapprochement du centre de gravité de la surface d'appui (Ferry, Martin, Termoz, Côté & Prince, 2004), ou la diminution de l'inertie liée à la position assise (Aruin & Zatsiorsky, 1989), soient plus à l'origine de la diminution des APAs en condition assise.

Dans le deuxième paradigme, la géométrie du corps est modifiée dans le but de déplacer la position du centre de gravité. Par exemple, Li et Aruin (2007) ont attaché des charges additionnelles (10, 20, 40% du poids du sujet) sur le corps des sujets, ce qui modifie la hauteur du centre de gravité. Les APAs ont été quantifiés par l'amplitude EMG des muscles du tronc et des membres inférieurs, ainsi que par les déplacements du centre de pression. L'augmentation de la masse du corps s'accompagne par des APAs sur les muscles du tronc et les muscles des membres inférieurs. Cependant, le niveau d'activation de ces APAs est augmenté avec l'augmentation de la charge rajoutée sur le corps des sujets. Des résultats

similaires ont été également obtenus par Robert, Blouin, Ruget & Mouchnino (2007). Dans une tâche de pointage combiné à une initiation de pas, ils ont montré que le rajout d'une charge au niveau de la tête, du côté ou à l'opposé du pied qui initie le pas modifie les APAs, tandis-que la trajectoire et les caractéristiques cinématiques du mouvement du bras (pointage) ne sont pas affectées. Il a été également démontré que les APAs sont modifiés avec la modification de l'inclinaison du tronc (Aruin, 2002). Une diminution des APAs ont été observés sur le rectus abdominis et le rectus femoris lorsque l'inclinaison passe de 15° à 45°.

3. APAs et contrainte temporelle

Le modèle Prédictif/Réactif de Paillard (1990) suppose deux modes de gestion de la motricité. Un mode réactif lorsque l'exécution du mouvement est soumise à une contrainte temporelle forte, et un mode prédictif où le mouvement est auto-initié, c'est-à-dire exécuté en l'absence de pression temporelle. Certaines études se sont intéressées à l'influence de ces deux modes sur les APAs et sur la coordination entre posture et mouvement. Par la suite, d'autres études ont exploré des tâches impliquant de l'anticipation-coïncidence ou un temps de réaction de choix (contrainte temporelle et incertitude événementielle). Nous allons essayer d'exposer les résultats de certaines de ces études tout en montrant les différences qui existent dans l'organisation des APAs entre ces différents modes de déclenchement.

3.1. APAs en mode réactif vs prédictif

Les études ayant exploré la modulation des APAs en fonction des contraintes temporelles réactive (TRS) et auto-initiée (AI) ont systématiquement montré des différences dans la durée des APAs et dans leur « timing » avec le mouvement focal. Lorsque la contrainte temporelle est forte (TRS), les APAs apparaissent tardivement et presque simultanément avec le mouvement focal, tandis-que lorsque le moment de déclenchement du mouvement est prévisible, les APAs apparaissent plut tôt et ont des durées plus longues (Horak *et al.*, 1984 ; Brown & Frank, 1987 ; Lee, Buchannan & Rogers, 1987 ; Benvenuti Panzer, Thomas & Hallett, 1990 ; Benvenuti, Stanhope, Thomas, Panzer & Hallett, 1997 ; De Wolf, Slijper & Latash, 1998 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper, Latash & Mardkoff, 2002 ; Bleuse, Cassim, Blatt, Defebvre & Guieu, 2002).

En utilisant trois contraintes biomécaniques différentes : soulever (1) une petite puis (2) une grande charge en position verticale, et (3) soulever une petite charge en position

inclinée vers l'avant, Benvenuti *et al.* (1997) avaient montré que l'intervalle entre le début de l'activité des muscles posturaux et le début de l'activité du premier muscle focal est réduite en condition TRS, et ceci quelque soit la contrainte biomécanique. De plus, ils ont constaté que l'ordre de recrutement des deux muscles posturaux Erector Spinae (ES) et Biceps Femoris (BF) est inversé entre les conditions TRS et AI. Cette inversion est peut-être due à une dissociation des synergies du tronc et des membres inférieurs correspondant à une différence dans les commandes centrales destinées à faire face aux contraintes temporelles (Benvenuti *et al.*, 1997). Cependant, cette inversion d'ordre ne réplique pas certains résultats obtenus par Lee *et al.* (1987) qui ont trouvé un ordre d'activation similaire des muscles ES et BF dans les conditions TRS et AI. Ultérieurement, en enregistrant uniquement les muscles posturaux du membre inférieur (Semitendineux et Gastrocnémiens ipsilatéraux ainsi que le Tenseur du Fascia Lata Controlatéral) à partir d'un mouvement de soulèvement de bras, Nougier *et al.* (1999) ont montré que l'ordre d'activation de ces muscles n'est pas modifié par la pression temporelle. Toutefois, en condition TRS les muscles posturaux sont activés presque simultanément (dans un intervalle de 10 ms) et en synchronisation avec le muscle focal. Dans la condition AI, les muscles posturaux ont des latences plus longues et sont activés clairement l'un après l'autre. Selon ces auteurs, il existerait deux stratégies différentes dépendamment de la contrainte temporelle. Lorsque le moment d'apparition du signal de déclenchement du mouvement n'est pas prévisible (TRS), la programmation du mouvement (composantes posturale et focale) serait basée sur une stratégie de synchronisation des commandes qui s'exécutent, dans ce cas, dans le même temps (« time-locked »). Inversement, lorsque l'exécution du mouvement est prédictible, une stratégie dite séquentielle est adoptée pour une meilleure coordination entre posture et mouvement (Nougier *et al.*, 1999). Cette stratégie permet, entre autre, une meilleure stabilité posturale. En effet, la zone dans laquelle se déplace le centre de pression en condition AI est inférieure à celle enregistrée en condition TRS. De plus, même si le déplacement total du centre de pression est similaire entre les conditions, en condition AI, les sujets passent plus de temps dans une zone d'incrément de 10mm autour de la moyenne du CP (Nougier *et al.*, 1999). En conclusion, lorsque les APAs apparaissent tardivement, il semble qu'ils soient alors mécaniquement sub-optimaux pour permettre une compensation acceptable (De Wolf *et al.*, 1998).

Dans une autre étude, De Wolf *et al.* (1998) voulaient vérifier si la modulation des APAs était reliée aux instructions caractérisant chacune des conditions de contrainte temporelle TRS et AI ou dépendait plutôt de la durée du temps de réaction. Deux tâches

motrices ont été utilisées : La première consistait en un délestage d'une charge au niveau du bras ; cette tâche a l'avantage d'isoler les effets de l'action motrice sur l'organisation des APAs. La deuxième tâche consistait en un soulèvement de bras à l'horizontale ; cette tâche est introduite pour comparer les données à d'autres études ayant utilisé ce mouvement. Il est apparu que le passage d'une consigne AI à une consigne TRS réduise le délai séparant le début des APAs au début du mouvement focal jusqu'à ce que les deux apparaissent simultanément. Ce phénomène a principalement été observé au niveau du CP et de l'EMG des muscles ES et BF. Toutefois, certains patterns d'APAs sont modifiés en condition TRS dans le but de compenser leur retard. D'abord il y a une augmentation de l'amplitude EMG (en tâche de délestage), une montée en vitesse sur certains muscles, l'émergence de bouffées EMG additionnelles, et enfin un déplacement élevé du CP dans les premières 100 ms suivant l'activation du muscle focal. Ces résultats montrent que le SNC fait face au changement d'instruction non seulement en décalant dans le temps l'apparition des APAs, mais également en modifiant certains patterns les caractérisant. Cependant, les auteurs n'excluent pas l'implication d'une stratégie dépendante du temps de réaction. En divisant les temps de réaction en quatre groupes TR1 à TR4 (du plus court au plus long), ils ont montré une certaine dépendance du déplacement anticipé du CP au temps de réaction dans la tâche de délestage, au point où, les valeurs en TR4 ne diffèrent plus de celles observées dans la condition AI. Certains sujets ont montré également une modification (équivalente à celle du CP) dans le timing des muscles posturaux en fonction du temps de réaction. L'allongement du TR permet donc aux APAs de survenir plus tôt, comme dans la condition AI. Ce temps additionnel peut donc être utilisé pour optimiser les effets mécaniques des APAs.

Cette dernière hypothèse a été testée par le même groupe de chercheurs (Slijper *et al.*, 2002) en utilisant une tâche de temps de réaction de choix (TRC) qui est par la suite comparée aux conditions TRS et AI. Slijper *et al.*, (2002) ont supposé que le SNC peut utiliser le temps supplémentaire induit par la tâche de TRC (loi de Hick (1952)) pour produire des APAs similaires à ceux observés en condition AI. Il faut cependant contrôler le fait que plus le temps de planification et de programmation du mouvement est long, plus les APAs surviennent tôt (Brown & Frank, 1987 ; Horak *et al.*, 1984 ; Inglin & Woollacott, 1988). Les auteurs ont donc éliminé les possibles effets de l'action motrice sur les APAs en utilisant la tâche de délestage d'une charge tenu entre les mains, bras à l'horizontale. Dans la condition TRC, les sujets étaient placés en face d'un panneau carré contenant quatre diodes placées sur les quatre coins. A l'allumage de l'une des diodes, les sujets devaient effectuer un léger

déplacement (8 cm) en direction de la diode qui s'allume. Ce mouvement impliquerait les mêmes muscles posturaux et provoquerait la même magnitude de perturbation posturale que dans les conditions TRS et AI. L'activité EMG montre que les APAs apparaissent plus tôt en condition TRC comparé à la condition TRS, tandis-que la comparaison entre TRC et AI ne montre pas de différence dans le délai qui sépare le début de l'activité posturale et le début de l'activité focale. On réplique également la corrélation négative entre le TR et le début de l'activité EMG, c'est-à-dire que plus le TR est long plus les APAs apparaissent tôt. Puisque les moyennes des TR entre les conditions TRC et TRS sont significativement différentes (301, 254 ms respectivement), cela peut expliquer les différences dans les patterns des APAs entre ces deux conditions. Cependant, il existe également un effet instruction (TRC vs TRS) sur le début de l'activité des muscles posturaux. L'activité posturale est retardée en moyenne de 5 ms en TRS.

L'analyse du déplacement du CP ne montre pas exactement les mêmes relations entre les conditions. En effet, l'activité du CP débute plus tôt en condition AI comparé aux conditions TRS et TRC. Toutefois, en condition TRC les déplacements du CP évoluent rapidement pour atteindre la position du CP en condition AI, 50 ms seulement après le début du mouvement. Ce comportement n'a pas été observé en condition TRS. Les résultats de cette étude ont montré que le SNC peut optimiser les APAs en tirant profit du temps disponible pour l'exécution du mouvement, mais que les APAs demeurent dépendants du mode de déclenchement (TRS, AI, et TRC).

3.2. APAs en mode d'anticipation-coïncidence

Dans la condition d'anticipation-coïncidence, les APAs ont été principalement étudiés dans des tâches de capture (« catching ») d'objets. Ces études ont montré une activité anticipatrice des muscles posturaux du tronc et des membres inférieurs lorsque les sujets, en position érigée bras tendus, interceptaient une charge tombant à partir d'une certaine hauteur (Lacquaniti & Maioli, 1989a,b ; Lavender & Marras, 1993 ; Aruin, Shiratori & Latash, 2001 ; Shiratori & Latash, 2001 ; Li & Aruin, 2008). Des paramètres tels que : hauteur et poids de la charge, présence ou absence de vision, auto-lâcher la charge ou charge lâchée par l'expérimentateur, changement de la distribution de la masse du corps ont été manipulés. Ces paramètres influenceraient principalement les informations sensorielles et les représentations

cognitives (spécificité de la tâche), et par conséquent les processus préparatoires et anticipatoires de l'action.

Par exemple Lacquiniti et Maioli (1989a,b) demandaient aux sujets d'intercepter une balle lâchée par l'expérimentateur à partir de différentes hauteurs (0.2, 0.4, 0.8, 1.2 m), le poids de la balle était varié pour chacune des hauteurs (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 kg). Des APAs ont été observés au niveau des muscles du bras avant l'impact. Cependant, la latence des APAs varie peu en fonction du poids de la charge lorsque celle-ci est lâchée de la même hauteur, et lorsque la même charge est lâchée à partir de différentes hauteurs, sauf pour le muscle extenseur radial du carpe. Ce muscle avait montré une augmentation de sa latence avec l'augmentation de la hauteur. Toutefois, la magnitude des APAs était corrélée positivement avec la force d'impulsion de la balle au contact. Lorsque les informations visuelles étaient remplacées par un signal auditif indiquant le moment du lâché de la balle, les sujets étaient incapables de générer des APAs, même si la hauteur et le poids de la balle étaient connus à l'avance (Lacquiniti & Maioli 1989b ; Aruin & Shiratori, 2001). Ces résultats suggèrent que les APAs sont dépendants de la capacité du SNC à estimer le temps au contact à partir de l'extraction des caractéristiques cinématiques du ballon grâce aux informations visuelles. Une fois que ce temps est estimé, les APAs sont initiés à un moment qui varie peu quelque soit la hauteur du lâché. Par-ailleurs, la modulation de l'amplitude des APAs en fonction de la force d'impulsion suppose l'existence d'un modèle interne représentant les propriétés physiques de la balle, ce qui permet d'anticiper le changement de la distribution des masses suite à l'impact de la charge sur la main.

Certaines études ont montré une absence des APAs au niveau du tronc et des membres inférieurs lorsque la perturbation est induite par l'expérimentateur (Dufossé *et al.*, 1985 ; Paulignan *et al.*, 1989 ; Struppler, Gerilovsky, & Jakob, 1993 ; Aruin & Latash, 1995a, 1996). Alors, Shiratori et Latash (2001) voulaient vérifier si la tâche d'interception mènerait aux mêmes effets (c'est-à-dire absence des APAs) dans une tâche d'AC lorsque le lâché était initié par l'expérimentateur (condition : 1). Les résultats obtenus dans cette condition étaient par la suite comparés à une autre condition où la perturbation était provoquée par le sujet en auto-lâchant la charge (condition : 2). Des APAs ont été observés au niveau des muscles du bras, du tronc et des membres inférieurs dans les deux conditions de perturbation. Cependant, les APAs apparaissent plus tôt et ont un délai peu variable dans la condition auto-lâchée (2)

comparé à la condition lâché-par-expérimentateur (1). Sur certains muscles, les APAs commencent 50 à 100 ms plus tôt dans la condition (2).

A certaines hauteurs de chute (0.1 et 0.2 m) les APAs n'apparaissent même pas dans la condition (1) où la durée de vol est très courte. En effet, dans la condition 1, les deux hauteurs de chute produisent des temps courts pour estimer le déplacement de la charge et anticiper le moment de l'impact (contrainte temporelle forte) ; les auteurs ont assimilé ces deux situations à une tâche de TRS. Inversement, lorsque le sujet provoque lui-même la chute de la charge, les APAs apparaissent quelque soit la hauteur, car le sujet connaît exactement le moment du lâché et peut prédire facilement le moment de l'impact. Cette condition (auto- lâchée) a été assimilée à une tâche AI.

Concernant l'amplitude des APAs, cette étude a montré, dans les deux conditions, une augmentation des APAs lorsque la même charge est lâchée à partir de différentes hauteurs, et lorsque différentes charges sont lâchées à partir de la même hauteur. Cela signifie qu'il existe une forte corrélation entre l'amplitude des APAs et les caractéristiques mécaniques de la chute de la charge (force d'impulsion et l'énergie cinétique). En effet, lorsque la hauteur du lâché est petite, l'énergie cinétique est réduite¹. Par conséquent, les sujets prédisent une petite perturbation, et génèrent ainsi une petite amplitude des APAs. Cependant, Shiratori et Latash (2001) n'excluent pas la possibilité de la diminution de l'amplitude qui serait due à la diminution de la latence des APAs lorsque la hauteur du lâché est petite dans la condition lâché-par-expérimentateur.

En conclusion, cette étude montre que pour prédire les effets de la perturbation et le moment de l'impact, les sujets arrivent à utiliser convenablement l'ensemble de sources d'informations, telles que : la masse et la hauteur de la charge, le moment du lâché et les caractéristiques cinématiques de la charge pendant la phase d'envol. Par conséquent, le SNC tente d'optimiser les APAs en fonction de la quantité d'information qu'il peut extraire. Ainsi, dans la condition auto-lâchée, un déclenchement intrinsèque des patterns des APAs est effectué avec un timing optimum par rapport au moment du lâché, tandis-que dans la condition lâché-par-expérimentateur, les APAs sont déclenchés en réponse au stimulus visuelle caractérisé par l'incertitude liée au moment du lâché de la charge par

¹ Selon la loi de la conservation de l'énergie mécanique, l'énergie cinétique ($\frac{1}{2} m V^2$) au moment de l'impact est égale à l'énergie potentielle au départ ($m.g.h$) où m = masse ; h = hauteur ; V = vitesse ; g = gravité.

l'expérimentateur. La différence dans ces deux mécanismes de déclenchement implique vraisemblablement des mécanismes différents de génération des APAs.

Problématique et hypothèses

Les données que nous avons présentées dans les précédents chapitres montrent que le SNC dispose d'une très grande souplesse et d'adaptabilité au niveau de l'élaboration, du contrôle et de la régulation du mouvement. Ces adaptations se caractérisent particulièrement par une différence de coordination entre l'activité posturale et l'activité focale lorsque le mouvement est déclenché sous les contraintes temporelles réactive (TRS) et auto-initié (AI). Cependant, ce modèle n'a pas été testé dans les tâches complexes avec un système multiple de degrés de liberté. Au regard des tâches que l'être humain a l'habitude de rencontrer dans sa vie quotidienne et particulièrement dans les activités physiques et sportives, il paraît intéressant de tester le modèle prédictif / réactif dans une tâche sportive complexe. Par ailleurs, les études de « catching » menées par Lacquaniti et Maioli, (1989a,b) ; Lavender et Marras (1993) ; Aruin *et al.*, (2001) ; Shiratori et Latash, (2001) ; et Li et Aruin, (2008) ont montré une certaine modulation des APAs et dans la coordination entre posture et mouvement lorsque la contrainte temporelle implique de l'anticipation-coïncidence. Cependant, les APAs n'ont jamais été comparés entre les trois conditions de pression temporelles TRS, AI et AC ; et n'ont jamais été étudiés lorsqu'un mouvement apparent (perturbation active créée par le sujet) doit coïncider avec le passage d'un mobile sur une cible.

Par conséquent, nous avons mené trois études expérimentales pour répondre essentiellement aux questions suivantes: (1) comment la coordination entre les composantes posturales et focales d'un mouvement complexe sont affectées par les différentes contraintes temporelles (TRS, AI, AC) ? (2) existe-t-il un mode de coordination posture / mouvement typique au mode de déclenchement en AC ? Ou s'agit-il seulement d'un mode flexible qui peut se rapprocher des modes TRS ou AI en fonction du temps disponible pour la préparation de la réponse ? (3) Existe-t-il différents modes de coordination posture / mouvement (hiérarchique, parallèle) déclenchés en fonction de la contrainte temporelle ?

Dans la première étude nous voulions confronter le modèle de coordination entre posture et mouvement en condition AI et TRS à une tâche sportive complexe tel que le tir en appui au handball. En prenant en considération la multiplicité des paramètres impliqués dans le mouvement, il est possible que les effets des contraintes temporelles, observés sur des tâches simples, ne produisent pas de tels effets sur les mouvements complexes. Par la suite, nous voulions élargir nos investigations sur une contrainte temporelle représentative des

activités sportives, qui est l'anticipation-coïncidence (AC). La prédictibilité du moment d'apparition du signal de déclenchement du mouvement suggère un mode de coordination similaire entre les conditions AI et AC. Cependant, une incertitude temporelle liée à l'estimation du temps avant le déclenchement subsiste. Donc, il est possible de voir apparaître un mode de coordination posture / mouvement spécifique à une condition AC.

Dans la situation AC de l'étude 1, les sujets disposaient de suffisamment de temps pour juger la vitesse du mobile et anticiper aisément la coïncidence du mobile avec la cible. Des études ont montré que plus le temps de préparation est grand, plus l'activité focale apparaît tardivement (De Wolf *et al.*, 1998 ; Slijper *et al.*, 2002 ; Cuisinier *et al.*, 2005). Ce paramètre « temps » qui précède le passage du mobile sur la cible aurait peut être influencé le comportement en AC qui se rapprocherait alors davantage de la situation AI. Dans l'étude 2, nous avons utilisé une tâche simple de soulèvement de bras à l'horizontale (tâche similaire à celle utilisée par Nougier *et al.*, 1999), puis manipulé le temps du déplacement du mobile avant la cible en modifiant sa vitesse (la distance parcourue reste fixe). De ce fait, si les hypothèses fournies par les études précitées s'appliquent à une tâche d'AC, alors on suggère que plus le temps de déplacement du mobile est court plus les comportements en AC seraient proches de la situation réactive. Inversement, plus le temps de déplacement du mobile est long plus les comportements en AC seraient proches de la situation auto-initiée. Cependant, une autre alternative supposant l'existence d'un mode de coordination typique à une tâche d'AC n'est pas à exclure.

Dans un deuxième temps, nous examinerons (étude 2) la modulation des APAs dans deux situations d'AC: (1) une situation de synchronisation du début du mouvement avec le passage du mobile sur une cible ; et (2) une situation de synchronisation de la fin (l'arrivée) du mouvement avec le passage du mobile sur une cible. Il est possible que dans la deuxième situation on enregistre une coordination posture / mouvement similaire à la condition AI, puisque le début de l'activité focale n'est plus contraint par le temps.

Dans l'étude 3, nous voulions répondre à la question cruciale : est-ce que les différences de coordination entre posture et mouvement observées dans les différentes conditions de contraintes temporelles sont liées à l'implication de différents modes de coordination entre posture et mouvement, à savoir les modèles parallèle et hiérarchique ? Les résultats des études 1 et 2, laissent supposer que le modèle hiérarchique opère en condition

TRS et le modèle parallèle opère en conditions non réactives (AC et AI). Pour vérifier cette hypothèse, nous avons combiné le paradigme stop avec les deux conditions de pression temporelle TRS et AC. L'inhibition quasi-simultanée de l'activité posturale et de l'activité focale signifierait l'existence d'une seule commande motrice (modèle hiérarchique) permettant de générer l'activité posturale et l'activité focale. Inversement, une inhibition focale qui n'est pas accompagnée par une inhibition posturale supposerait une dissociation des commandes (modèle parallèle) posturale et focale impliquées dans le mouvement.

PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre IV. Modulation des ajustements posturaux anticipateurs dans les tâches complexes réalisées sous différentes contraintes temporelles¹.

1. Introduction

Les mouvements intentionnels peuvent être déclenchés sous différentes conditions de pressions temporelles ; une condition réactive en réponse à un signal externe (tâche de temps de réaction simple : TRS) et une condition prédictive où le mouvement est auto-initié (AI; Paillard, 1947, 1990; Paillard *et al.*, 1989; Bard *et al.*, 1992). Il a été montré que la coordination entre deux segments corporels (relèvement doigt – talon) est modifiée par la pression temporelle. Les différences observées sont attribuées aux processus centraux précédant l'initiation du mouvement (Blouin *et al.*, 2004). Cependant, ces études ont été réalisées sous des conditions posturales peu contraignantes (position assise ou allongée) ce qui peut rendre hasardeuses les généralisations à d'autres situations. En effet, dans les tâches impliquant la stabilité du corps, des ajustements doivent être initiés avant le début du mouvement intentionnel (mouvement focal) ; le mouvement implique des ajustements posturaux anticipateurs (APAs) qui sont générés par un mécanisme de contrôle en boucle ouverte dans le but de minimiser les effets de la perturbation attendue sur l'équilibre (Massion, 1992). Par conséquent, il est intéressant de vérifier si les APAs sont affectés par la contrainte temporelle. La littérature fournit quelques éléments de réponse à cette question.

Dans les études pionnières sur les APAs, le sujet était engagé dans une tâche de soulèvement de bras (Belenkii *et al.*, 1967; Cordo & Nashner, 1982; Bouisset & Zattara, 1983, 1987; Clément *et al.*, 1984). Les données issues de cette tâche simple ont montré que les muscles posturaux sont activés avant ceux qui sont impliqués directement dans l'exécution du mouvement volontaire (muscles focaux). Par la suite, les délais d'activation entre ces muscles (posturaux vs focaux) sont modulés selon que le mouvement est exécuté en condition de TRS ou en condition AI (Benvenuti *et al.*, 1990; 1997 ; De Wolf *et al.*, 1998 ; Slijper *et al.*, 2002). Dans la condition AI, les APAs commencent plus tôt et précèdent l'activité focale d'un délai plus large comparé à celui enregistré en condition de TRS. Par-ailleurs, la séquence d'activation des muscles posturaux est similaire entre les conditions, mais le délai qui sépare l'activation de chaque muscle est différent. Cependant, dans la condition de TRS, les muscles posturaux sont activés presque simultanément, tandis-que dans la condition AI, les muscles posturaux sont clairement activés l'un après l'autre (Nougier *et al.*, 1999).

¹ Cette étude a fait l'objet d'une publication dans le revue « Motor Control » en novembre 2008.

Les études mentionnées ci-dessus soutiennent l'existence de deux modes de contrôle, réactif et prédictif, pour des mouvements simples. Toutefois, la littérature ne fournit pas de données sur la modulation des APAs sous les contraintes réactive et prédictive lorsque la tâche est complexe, et/ou lorsque la pression temporelle implique de l'anticipation-coïncidence (AC). Par conséquent, l'objectif de cette étude est d'examiner les effets de la contrainte temporelle (TRS, AI, AC) sur la coordination entre les APAs et l'activité focale dans les tâches complexes.

Le problème du transfert des conclusions obtenues dans des tâches expérimentales simples ne doit pas être sous-estimé au vu de la complexité que constitue le système homme-environnement. Il semble souvent que les effets soient assez spécifiques aux conditions dans lesquelles ils ont été observés (Heure, 1988) ; il est difficile, dans ces circonstances, de généraliser à partir de ces tâches expérimentales simples (mais effectives) à des tâches plus complexes et écologiques (cf. à Meijer & Roth, 1988 pour une revue complète). Par exemple, Bard *et al.* (1995) ont fourni quelques résultats liés au transfert associé à l'entraînement d'une tâche simple (appuyer sur un bouton en coïncidence avec l'arrivée d'un mouvement apparent) et d'une tâche complexe (lancer un disque pour intercepter un mouvement apparent). Il s'avère que la complexité de la tâche modifie significativement l'organisation du comportement moteur (erreur temporelle constante, le temps d'initiation du lancé et la durée du lancé). En outre, le groupe qui avait pratiqué la tâche complexe avait amélioré ses performances à la suite de l'entraînement, contrairement au groupe qui avait pratiqué la tâche simple. Ceci a été interprété comme l'évidence de l'existence d'une meilleure flexibilité dans le mouvement d'interception, permettant une modulation des réponses motrices en fonction des contraintes de l'environnement. Cela va dans le sens des résultats de certaines études (Newell, 1989; McDonald, van Emmerick, & Newell, 1989) qui ont montré des changements de la coordination motrice en fonction de la pratique et des contraintes de la tâche motrice. De la même façon, Inglin et Woollacott (1988) ont montré que le timing et la séquence d'activation des APAs, associés à un soulèvement de bras, sont modulés par l'interaction entre l'âge (jeunes adultes vs personnes âgées), la tâche (tirer vs pousser) et les contraintes environnementales (tâche de temps de réaction simple ou de choix).

Puisque la complexité de la tâche affecte le comportement moteur et la pratique et/ou l'âge modifie la coordination motrice, il est donc hasardeux d'appliquer les conclusions

obtenues sur des tâches simples et relativement nouvelles et peu pratiquées à des tâches complexes et largement pratiquées.

Les habiletés motrices fournissent un bon modèle de comportements moteurs qui sont extensivement pratiqués. Parmi ces habiletés, le lancer est considéré comme l'habileté fondamentale dans plusieurs activités sportives. Plusieurs facteurs concourent à la complexité de la tâche : la vitesse, le grand nombre de degrés de libertés et les mouvements articulaires impliqués (ceinture pelvienne, rotation au niveau de la colonne vertébrale et de l'épaule, extension du coude et flexion du poignet (Hong, Cheung, & Roberts, 2001)). Chaque élément du corps est partie intégrante d'une chaîne cinétique impliquant une séquence d'activation musculaire spécifique pour donner au projectile un maximum de vitesse et de précision (cf. Putnam, 1993). En prenant en considération la multiplicité des paramètres impliqués dans le mouvement, il est possible que les effets des contraintes temporelles observés sur des tâches simples, ne produisent pas de tels effets sur les mouvements complexes.

Le tir en appui au handball (les pieds restant en contact avec le sol) offre un bon modèle de lancer qui peut être exécuté dans différentes conditions de pression temporelles : réactive, anticipation-coïncidence et auto-initiée. Puisque chaque joueur de handball pratique cette habileté de manière extensive, nous postulons que les pratiquants ont une représentation interne du mouvement, incluant des schémas posturo-cinétiques prescrits. Un geste sur-pratiqué semble être un moyen puissant pour tester les effets de la contrainte temporelle dans les tâches complexes. Nos résultats devraient montrer une différence dans les schémas posturo-cinétiques entre les trois conditions, reflétant ainsi, des différences dans le processus préparatoire au mouvement.

Dévoiler les schémas posturo-cinétiques sur des mouvements impliquant la totalité du corps semble être un énorme défi. L'enregistrement de l'activité EMG dans les tâches de soulèvement de bras à partir d'une position bi-pédique semble relativement simple, mais sur un geste de lancer, il existe un grand nombre de muscles qui sont impliqués dans les ajustements posturaux. Bien que certains muscles sont considérés comme majeurs pour le geste, il existe certains muscles, difficiles à identifier et à enregistrer (tels que les muscles posturaux profonds), qui peuvent avoir un large impact sur la coordination globale. Par conséquent, il est nécessaire de trouver un indice plus global et sensible aux activités posturale et focale. On présume que la plateforme de force fournit une image globale et valide

de la coordination corporelle pour une tâche complexe. Les schémas posturo-cinétiques affectent directement les forces de réaction au sol (FRS) qui reflètent ainsi l'activité posturale globale durant le lancer. Les accélérations du poignet sont à même de fournir un indice de l'activité focale. En outre, ces enregistrements devraient fournir des résultats permettant de répondre aux questions suivantes : (1) comment la coordination entre les composantes posturales et focales d'un mouvement complexe est affectée par les contraintes temporelles ? (2) est-ce que le comportement moteur dans la condition d'anticipation-coïncidence est proche de la condition réactive ou auto-initiée ? (3) est-ce que les composantes posturales et focales du mouvement sont affectées indépendamment par la contrainte temporelle ?

2. Méthode

2.1. Sujets

Dix-huit handballeurs de sexe masculin, âgés entre 18 et 34 ans étaient volontaires pour participer à cette étude (âge moyen = 24.5 ; écart-type = 3.1). Tous les participants ont signé un formulaire de consentement qui était approuvé par le service « Sécurité & Santé » de l'université. Deux sujets n'ont pas été intégrés dans l'analyse des données en raison d'un problème technique sur l'enregistrement de l'impact de la balle.

2.2. Matériel

Une plateforme de force de type KistlerTM (Model : 9286A, taille: 60 × 40 cm, model de l'amplificateur : 9865E) a été utilisée pour enregistrer les FRS sur l'axe gravitaire (Fz), sagittal (Fy) et frontal (Fx). Les accélérations au niveau du poignet ont été enregistrées à l'aide d'un accéléromètre mono-axiale (Biopac, TSD109F). Un microphone piézoélectrique (fabriqué en laboratoire) fournit le moment de l'arrivée de la balle sur la cible de tir (planche carrée 50 X 50 cm). Cette cible doit être atteinte après chaque lancé.

Dans la condition AC, le stimulus était animé par une vidéo projetée sur la cible de tir (figure IV-1). Le stimulus est le même que celui utilisé par Larue (2007) qui a montré des résultats consistants dans l'étude de la coordination inter-segmentaire de deux effecteurs (doigt-talon) dans une tâche d'AC. Le stimulus était utilisé uniquement pour fournir le moment de déclenchement de la réponse ; il ne vise aucunement à reproduire une quelconque situation réelle. Ce stimulus consiste en un cercle plein qui se déplace de haut en bas à une

vitesse angulaire constante autour d'une spirale 3D qui est dessinée sur un cylindre verticale transparent (figure IV-1). Le stimulus passe par une cible temporelle située dans la portion inférieure du cylindre et fournit ainsi le moment de déclenchement du mouvement. La durée de la trajectoire avant d'atteindre la cible temporelle est de 5100 ms ; ainsi, les sujets ont suffisamment de temps de juger correctement la trajectoire et le timing du mobile. L'exposition du stimulus était contrôlée par un programme développé sous Matlab (R11) ; un signal TTL était généré au moment où le mobile passe sur la cible temporelle.

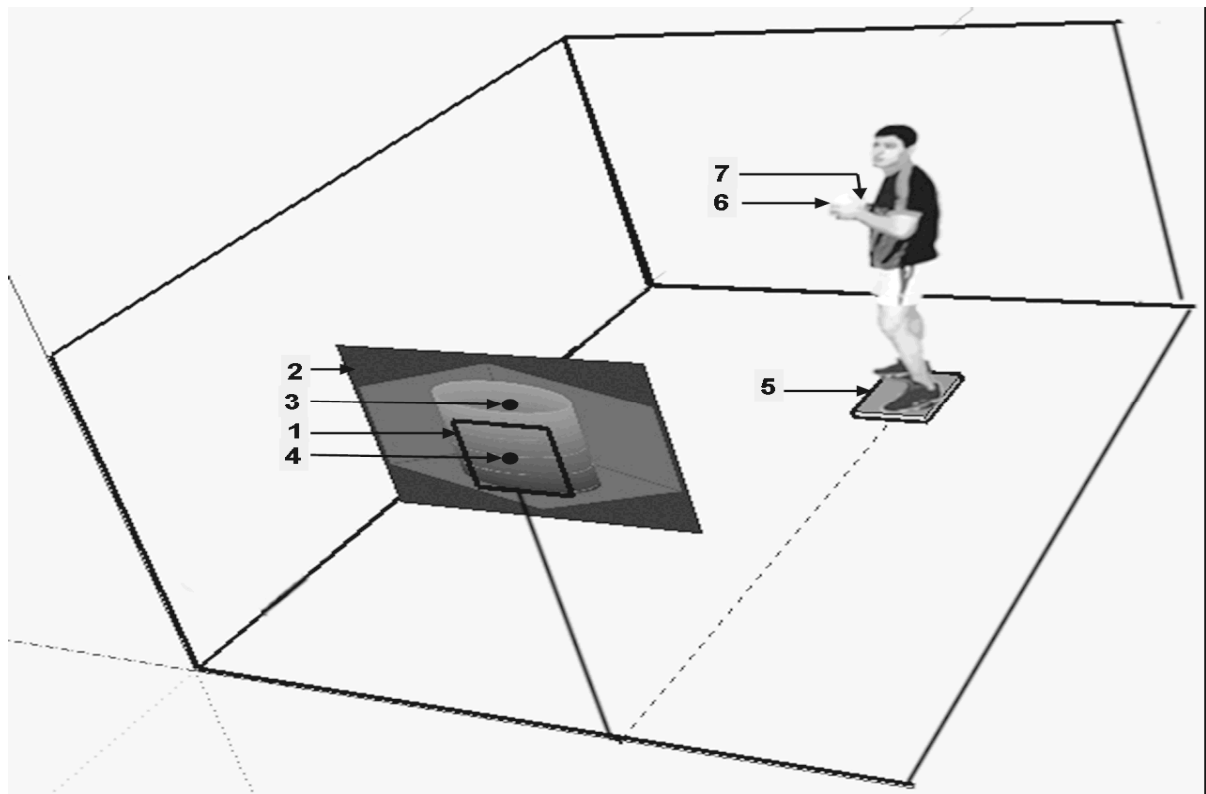


Figure IV-1 : Illustration de l'installation et de la procédure expérimentale. La figure montre la position initiale typique d'un sujet droitier. L'appui controlatéral au bras lanceur est positionné devant, tandis-que l'appui ipsilatéral est positionné derrière. La balle (1 : 450 g, circonférence = 58 cm) est prise entre les mains au niveau du thorax. Tous les sujets placent leurs appuis sur les limites de la plateforme (2 : 60 X 40 cm) ; la variation de la distance inter-malléolaire entre les sujets est inférieure à 5 cm (maximum – minimum). (3) Planche en bois (50 x 50 cm) constituant une cible de tir. Elle est située à 3.5 mètres du bord frontal de la plateforme de force, sa hauteur est ajustable en fonction de la hauteur des yeux du sujet. (4) La scène vidéo projetée du stimulus utilisé dans la tâche d'anticipation-coïncidence (AC). L'image est agrandie sur la figure pour une meilleure illustration, mais en pratique, cette image entoure la planche qui fait état de la cible de tir. (5) Point ayant un diamètre de 1 centimètre qui est vidéo projeté, il constitue le mobile. (6) point de fixation de l'œil (diamètre = 1 cm) situé au centre de la planche. Ce point correspond à la cible temporelle dans la condition AC et à la LED dans la condition réactive. (7) Accéléromètre.

La scène vidéo projetée (stimulus) entoure la cible de tir (50 X 50 cm, délimitée par un arrière plan noir). Cette cible se situe à 3.5 mètres du bord de la plateforme de force ; sa hauteur est fixée de façon à ce que son centre corresponde à la hauteur des yeux de chaque sujet. Un point de fixation visuelle (point noir d'un centimètre de diamètre) a été placé au centre de la cible de tir. Au centre du point de fixation, une LED (Light Emitting Diode ; rayon = 2.5mm) rouge a été installée pour fournir le stimulus utilisé dans la condition réactive. Ainsi, dans la condition réactive, il n'y a pas de projection de stimulus ; en remplacement de celle-ci, la LED rouge envoie un stimulus visuel. Par la suite, les sujets devraient répondre le plus rapidement possible à l'apparition de ce stimulus.

Tout les signaux ont été enregistrés simultanément grâce au logiciel Bioware (Kistler) avec une carte d'acquisition A/D (model CIO-DAS1602, résolution 16 bits) à une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz. Par la suite, ces données ont été exportées de BiowareTM à MatlabTM pour effectuer les traitements nécessaires.

2.3. Tâche

Dans toutes les conditions, les sujets étaient appelés à exécuter un *tir en appui* au handball avec un maximum de force, de vitesse et de précision (tous les essais doivent atteindre la cible, figure IV-1). Les sujets n'ont pas reçu d'instructions spécifiques concernant le lancé même, car ce geste est basique et sur-pratiqué par les joueurs de handball. Cependant, avant chaque lancé, les sujets doivent se mettre sur la plateforme de force et stabiliser leurs posture. Ensuite, tout en regardant droit la cible de tir, ils doivent fixer du regard un point situé au centre de la planche. Tous les lancés en dehors de la cible de tir (approximativement 2% de l'ensemble des tirs) sont rejetés. Des essais supplémentaires ont été exécutés pour remplacer les tirs manqués.

2.4. Procédure

Les sujets ont été testés individuellement en une seule session expérimentale. L'accéléromètre était attaché fermement à la face externe du poignet de la main préférentielle (l'axe de l'accéléromètre était orienté vers la face interne du poignet). Puis les sujets étaient appelés à se mettre debout sur la plateforme et d'adopter leur propre posture pour lancer la balle. Ils sont libres d'adopter la position la plus confortable, mais de conserver cette position

sur l'ensemble des essais et des conditions. Comme les sujets vont être comparés au travers des conditions, le positionnement des sujets a été vérifié avec attention. En pratique, le positionnement des appuis sur la plateforme reste stable en raison de la taille des sujets (taille moyenne = 1.83 m, ET = 3.9) qui tentent d'utiliser la plus grande surface possible pour élargir le polygone de sustentation ; ainsi, tous les sujets placent leurs appuis proche des bords de la plateforme de force. Par conséquent, les différences qui pourraient être engendrées par les variations interindividuelles de positionnement des appuis ne devraient certainement pas être suffisantes pour influencer les APAs de manière importante. En effet, de telles influences nécessitent une grande différence dans le positionnement des appuis (Robert, 2007). De plus, il a été montré que, lorsque le positionnement des appuis d'un sujet change de 0 à 40 cm, la durée des APAs n'est pas modifiée (Yiou *et al.*, 2007).

Les sujets étaient maintenus dans l'ignorance des objectifs de l'étude et ont découvert les conditions expérimentales l'une après l'autre. Trois conditions expérimentales ont été testées : (1) dans la condition réactive, les sujets devaient répondre le plus rapidement possible à l'allumage de la LED rouge. C'est une situation de temps de réaction simple (TRS). Le signal apparaît aléatoirement dans un intervalle de temps de 10 secondes. (2) dans la condition d'anticipation-coïncidence (AC), les sujets sont appelés à synchroniser l'impact de la balle sur la planche avec le passage du mobile visuel sur la cible temporelle (voir matériel). (3) dans la dernière condition, les sujets auto-initient (AI) le lancer lorsqu'ils se sentent prêts. L'ordre de présentation des conditions était contrebalancé entre les sujets. Avant chaque condition expérimentale, quelques essais de familiarisation étaient effectués. Dix essais valides ont été collectés dans chaque condition. L'essai est rejeté lorsque : le lancer était en dehors de la cible de tir (planche) ; la posture initiale était modifiée ; le lancer était faible (lent) ; ou le sujet sent qu'il avait raté son lancer. L'ensemble des essais rejetés était inférieur à 5 %.

2.5. Traitement des données

Chaque essai était traité individuellement. Les données enregistrées sur les trois axes de la plateforme de force (X, Y, Z) et de l'accéléromètre ont été soumis à un algorithme développé dans l'environnement Matlab (R11) pour détecter six points temporels caractérisant les différents tracés (figure IV-2 A). Ces points ont été établis après une comparaison minutieuse de tous les enregistrements pour identifier les caractéristiques

communes observées au travers des essais et des sujets. Ces points sont : (1) le début, qui correspond au premier zéro de la deuxième dérivée, trouvé itérativement à partir de l'occurrence du premier point équivalent à 10 % de l'amplitude maximale. (2) la fin, qui correspond à un point arbitraire déterminé à partir d'une caractéristique reproductible des tracés avant l'impact de la balle. (3) les amplitudes maximum (Pmax) et (4) minimum (Pmin) de l'onde centrale des courbes¹. (5) stimulus (dans les conditions TRS et AC seulement). (6) l'impact de la balle. Chaque courbe est contrôlée visuellement pour détecter et corriger les éventuelles erreurs de marquage, qui sont dues à la rigidité de l'algorithme. Il est intéressant de noter que quelques enregistrements vidéo numériques (résolution de 40 ms) ont été réalisés sur certains essais pour relier les points marqués sur les courbes des FRS et de l'accéléromètre au mouvement cinématique du sujet. Ces enregistrements vidéo ont été synchronisés grâce à une diode qui s'allume au moment de l'apparition du stimulus. Ce qui semble le plus informatif de ces données est le moment du lâché de la balle, qui survient entre le zéro correspondant à l'inversion du signe sur la courbe d'accélération et le point max (figure IV-4).

Un autre programme nous permet de vérifier et de corriger les marquages, et de voir le degré de synchronisation du sujet à travers les différents essais. Pour cela, les courbes ont été normalisées par rapport à la durée du mouvement, moyennées avec calcul des écarts-types, synchronisées, puis superposées (figure IV-2 B). Grâce à ces courbes moyennes et ces écarts-types, il est possible d'évaluer la qualité et éventuellement de corriger les erreurs de marquage, mais surtout de s'assurer de la reproductibilité individuelle des lancers. La faible variabilité (calculée comme l'aire qui est entourée par $\pm$ l'écart-type; figure IV-2 C) entre les tracés implique un comportement reproductible au travers des essais. Ce second programme montre graphiquement toute erreur sur un essai donné. Toute erreur dans le marquage automatique est corrigée après un contrôle visuel minutieux.

¹ Les amplitudes Pmax et Pmin sont marquées d'après la forme générale des courbes. Ainsi, pour certains essais, les points marqués ne représentent pas concrètement les amplitudes max et min de la courbe, mais les amplitudes max et min de l'onde principale de la courbe qui est commune à tous les essais.

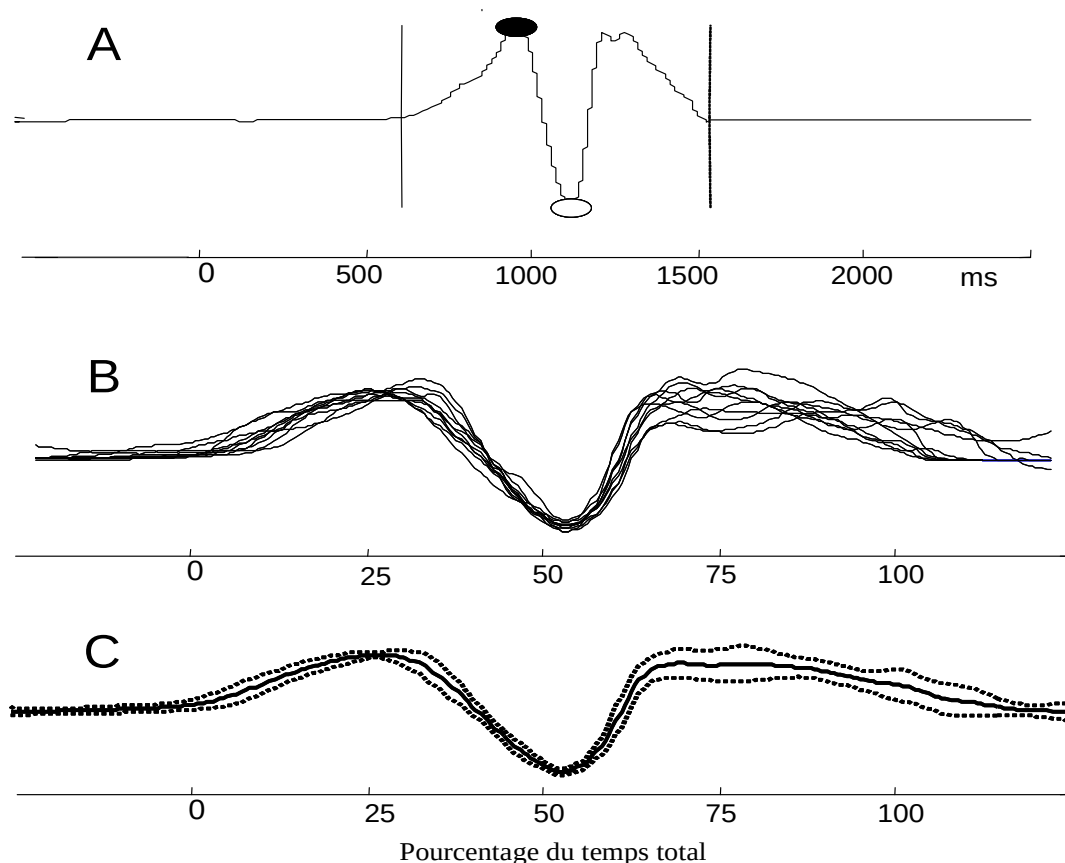


Figure IV-2: Figure illustrant le traitement des données. Dans cet exemple, les FRS sur l'axe Y dans la condition auto-initiée sont représentées. **A :** essai individuel pour la force considérée. L'amplitude est normalisée mais le temps représente le temps réel d'exécution. Les repères temporels verticaux représentent ceux du début (à gauche) et de la fin (à droite). Les amplitudes max et min sont représentées respectivement par le cercle plein et le cercle vide. **B :** illustration de la superposition des dix essais d'un sujet ; les courbes sont standardisées par rapport au temps de mouvement de tel sorte à ce que le temps total du mouvement soit équivalent à 100%. Chaque courbe commence à -25 % et finit à + 25 % du temps de mouvement total. **C :** courbe moyenne $\pm$ l'écart-type des dix essais d'un sujet dans une condition donnée (AI).

Notre intérêt porte essentiellement sur l'organisation temporelle des commandes; par conséquent, nos analyses ont été axées sur les paramètres temporels des courbes. Six délais ont été calculés à partir des points marqués : (1) le délai entre le début des courbes de force (en X, Y et Z) et le début de l'accélération (DFAs); un délai positif signifie que les FRS précèdent l'accélération du bras, ceci n'est possible qu'en présence des APAs. Toute activité (forces et accélération) survenant après le début de l'accélération est considérée être principalement le résultat de l'activité focale. (2) le temps de mouvement (TM) est défini

comme l'intervalle de temps entre le point du début et le point de la fin. (3) le temps au point maximum ($T_{\max}$) et (4) le temps au point minimum ($T_{\min}$) sont représentés par le délai entre le point du début et respectivement le moment d'apparition de $P_{\max}$ et $P_{\min}$. (5) le temps à l'impact (T_{imp}) est le délai entre le début de la courbe et le moment de l'impact de la balle sur la planche. (6) pour chaque variable, l'indice de variabilité (IV) est calculé comme l'écart-type divisé par sa moyenne.

De façon à comparer les données des trois modes de déclenchement, des ANOVAs à mesures répétées ont été menées dans le module GLM de l'environnement Statistica™ (V 5.1). Les variables ont fait l'objet d'analyse de variance ; des tests *a posteriori* de Tukey ont été effectués lorsque les effets étaient significatifs. Le seuil de signification statistique a été fixé à 0.05. Pour se préserver des violations des conditions de sphéricité de l'analyse de variance à mesures répétées, les niveaux de probabilité ont été ajustés selon la procédure de Greenhouse-Geisser.

3. Résultats

3.1. Délais entre le début des forces et des accélérations (DFA)

L'ANOVA 3 (Condition) X 3 (DFA) à mesures répétées a montré un effet DFA [$F_{(2,30)} = 15.3, p < .0001$], un effet Condition [$F_{(2, 30)} = 11.8, p < .0001$], et une interaction significative des facteurs Condition X DFA [$F_{(4, 60)} = 4.8, p < .002$]. La figure IV-3 montre les délais entre le début des FRS (activité posturale) et le début de l'accélération du bras (activité focale) ; un délai positif indique que l'activité posturale précède l'activité focale. Les tests post hoc ont montré que le DFA dans la condition TRS sont significativement inférieurs aux délais enregistrés dans les conditions AC et AI. La différence de DFA entre AC et AI n'est pas significative. De plus, dans la condition TRS, les FRS surviennent presque au même temps (48, 50, et 65 ms avant le début d'accélération respectivement sur les axes Z, X et Y). En revanche, dans les conditions AC et AI, les DFA sont plus long et plus distincts (100, 150 et 190 ms respectivement sur les axes Z, X et Y). Par conséquent, l'initiation de l'activité posturale comparée à l'activité focale survient plus tôt dans les conditions non réactives, comme illustré sur la figure IV-4.

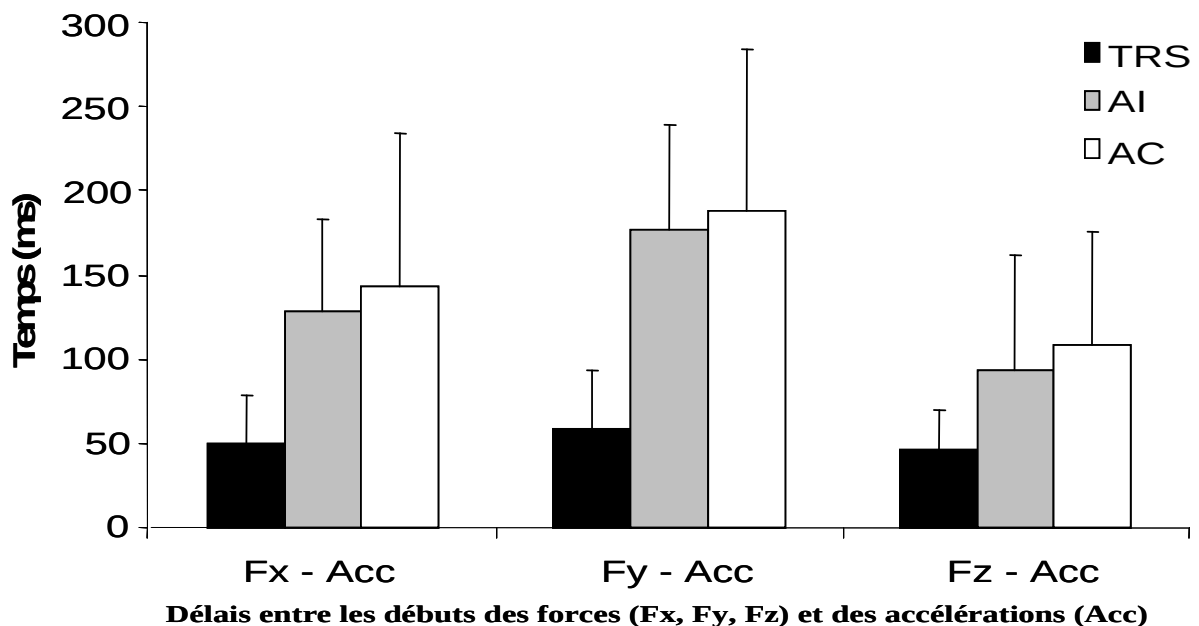


Figure IV-3: Moyenne et écart-types des délais entre le début des forces de réaction au sol sur chacun des trois axes (Fx [frontal], Fy [sagittal], et Fz [vertical]) et le début des accélérations du bras (Acc) pour chaque condition expérimentale (TRS [condition de temps de réaction simple] ; AC [condition d'anticipation-coïncidence] ; AI [condition auto-initiée]). La condition TRS produit un délai court sur tous les axes ; les délais ne sont pas différents entre les conditions AC et AI.

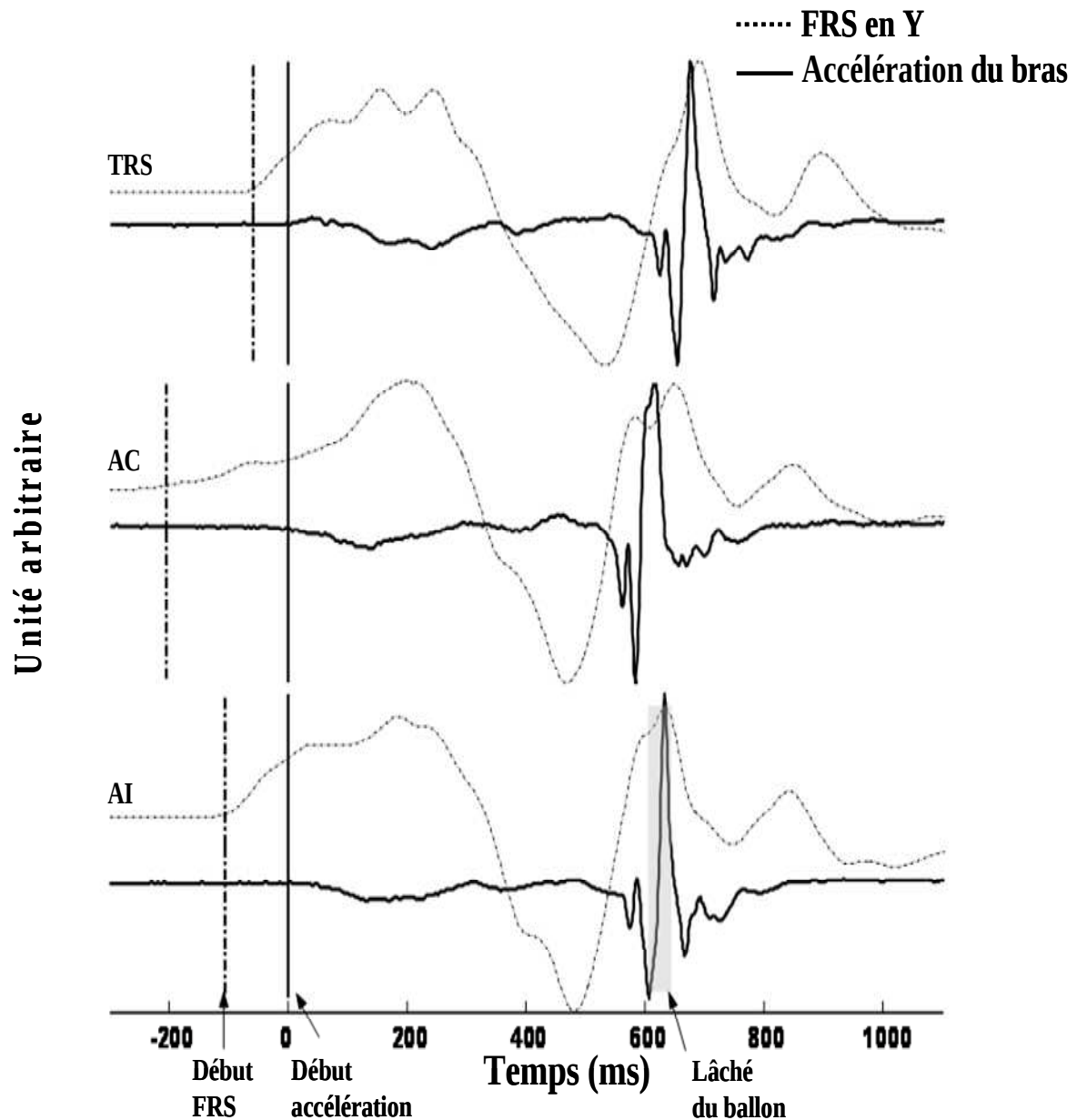


Figure IV-4: Essais typiques d'un sujet montrant les effets des conditions de pression temporelle sur la variable délai forces accélération (DFA) (de haut en bas : TRS [condition de temps de réaction simple] ; AC [condition d'anticipation-coïncidence] ; AI [condition auto-initiée]). FRS : forces de réaction au sol sur l'axe sagittal Y ; le début des forces est représenté par les lignes verticales en pointillées. Le début des accélérations du bras est représenté par les lignes verticales continues. Les amplitudes sont normalisées. Les courbes sont synchronisées au début de l'accélération. La bande grise (3^{ème} panneau) correspond au moment du lâché du ballon. Ce moment survient entre le zéro correspondant à l'inversion du signe sur la courbe d'accélération et le point maximum (enregistrement vidéo avec une résolution de 40 ms).

3.2. Durées entre le début de chaque courbe et les différents points marqués (Pmin, Pmax, Pimp, TM)

Une ANOVA 3 (Condition) X 4 (Courbe) à mesures répétées a été utilisée pour chaque variable temporelle. Il y a un effet principal des deux facteurs Condition et Courbe concernant toutes les variables temporelles (TM, Tmax, Tmin, Timp ; tableau IV-1) à l'exception de la variable TM pour le facteur courbe. Les analyses post-hoc avaient montré que les durées de toutes les variables en condition TRS étaient significativement inférieures à celles enregistrées dans les conditions AC et AI. Ces durées ne sont pas significativement différentes entre les conditions AC et AI. Sur toutes les variables, les patterns temporels sont similaires : durées courtes en condition réactive (TRS) ; intermédiaires en condition AC ; et des durées plus longues en condition AI. La figure IV-5 montre que l'ensemble des durées sont significativement inférieures dans la condition TRS par rapport aux conditions AI et AC.

Tableau IV-1: Résultats de l'ANOVA 3 (Condition) X 4 (Courbe) pour chacune des variables temporelles et les indices de variabilité correspondants.

		Moyennes							
		TM		Tmax		Tmin		Timp	
Effet	ddl	F	p	F	p	F	p	F	p
Condition	(2,30)	23.3	<.0001	16.8	<.0001	15.38	<.0001	22.6	<.0001
Courbe	(3,45)	—	—	21.4	<.0001	10.2	<.0001	36.6	<.0001
Condition X Courbe	(6,90)	2.9	<.01	—	—	40.3	<.0001	6.8	<.0001

		Indice de Variabilité							
		TM		Tmax		Tmin		Timp	
Effet	ddl	F	p	F	p	F	p	F	p
Condition	(2,30)	6.9	<.003	11.3	<.0002	10.3	<.0004	12.8	<.0001
Courbe	(3,45)	3.5	<.02	8.1	<.0002	14.8	<.0001	Pas d'effe après les ajustments par le test G-G	
Condition X Courbe	(6,90)	2.8	<.01	—	—	—	—		

ddl : degrés de liberté; TM : temps de mouvement; Tmax = temps au point max; Tmin : temps au point min; Timp : temps à l'impact; les barres horizontales = pas d'effets significatifs. G-G = test de Greenhouse-Geisser.

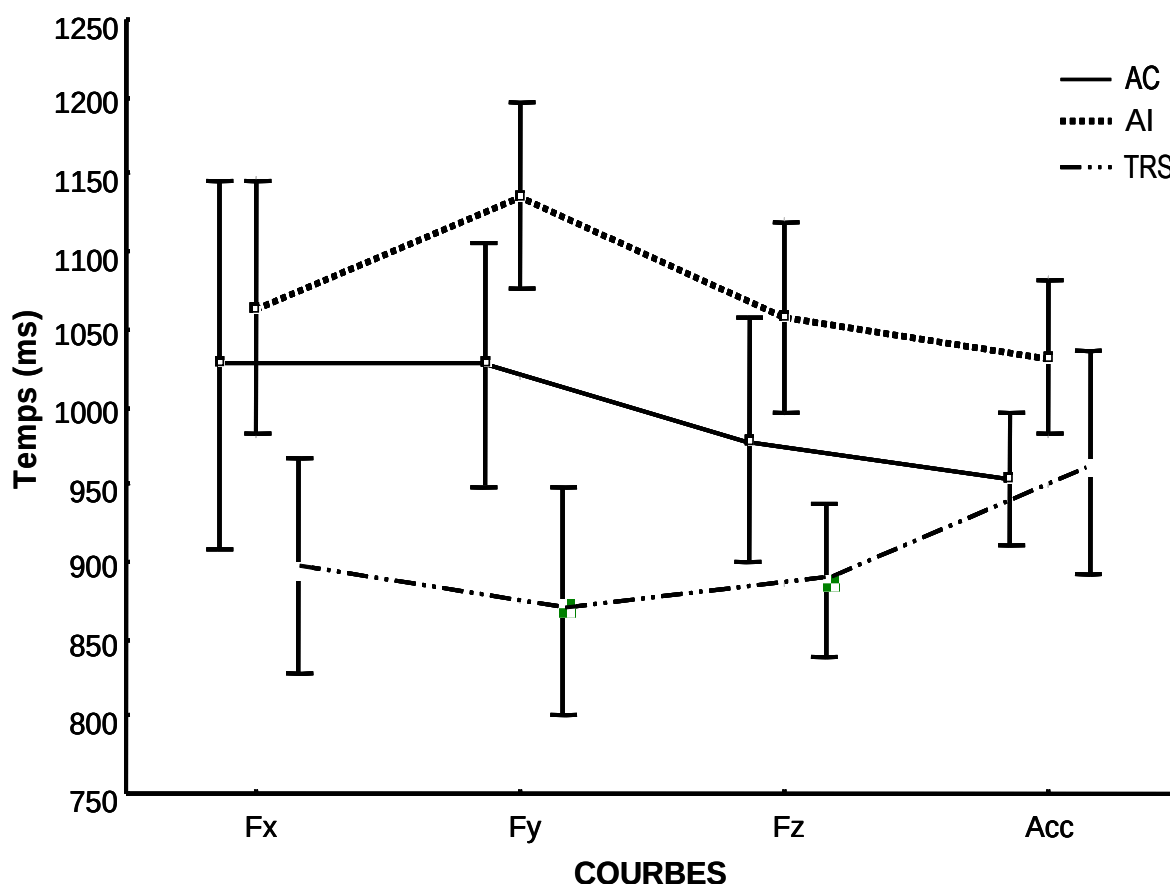


Figure IV-5 : Moyennes et écart-types du temps de mouvement (TM) pour chacun des axes (Fx [frontal], Fy [sagittal], et Fz [vertical]) et conditions expérimentales (TRS [condition de temps de réaction simple] ; AC [condition d'anticipation-coïncidence] ; AI [condition auto-initiée]).

Les mêmes analyses ont montré une interaction significative entre les facteurs Condition et Courbe concernant les variables TM, Tmin et Timp (figure IV-5 et tableau IV-1). Il s'avère donc que les conditions expérimentales affectent différemment le comportement moteur en fonction des différents plans (axes) du mouvement. L'interaction significative de ces deux facteurs est le résultat des durées courtes qui sont enregistrées sur les axes sagittal (Y) et frontal (X) dans la condition TRS par rapport aux conditions AC et AI. Ces deux dernières ne diffèrent pas entre elles. En effet, ce geste de lancé implique des déplacements importants sur ces deux axes (X et Y) ; d'abord pour l'armé du bras puis pour la propulsion du ballon vers l'avant.

A la fin, nous avons vérifié si le mouvement focal était exécuté de façon similaire entre les conditions. Les variables temporelles des courbes d'accélération ne montrent aucune différence significative entre les conditions (TM [figure IV-5], Tmax, Tmin, Timp). De plus,

des ANOVAs (3 Conditions) ont été effectuées sur les amplitudes maximum et minimum enregistrées sur les accélérations. Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les conditions [$F_{(2, 30)} = 0.48, p > .62$; $F_{(2, 30)} = 2.44, p > .1$, respectivement, pour les amplitudes maximum et minimum]. La dernière analyse concerne la variabilité enregistrée sur les accélérations. Les résultats n'ont pas montré de différence significative, que ce soit sur les variables temporelles [exemple pour T_{min} , $F_{(2, 30)} = 2.27, p > .1$] ou sur les amplitudes [$F_{(2,30)} = 0.48, p > .6$; $F_{(2,30)} = 0.19, p > .8$ pour les amplitudes maximum et minimum respectivement]. L'absence de différences statistiques sur les variables enregistrées sur les courbes d'accélération (temporelles, amplitudes, variabilité) signifie qu'il y a peu ou pas de variations dans l'exécution du mouvement focal au travers des conditions expérimentales.

3.3. Variabilité

Les valeurs des indices de variabilité (IV) ont été soumises aux mêmes méthodes statistiques utilisées précédemment sur les variables temporelles. Les résultats de ces analyses ont montré un effet significatif des principaux facteurs Condition et Courbe sur les variables suivante : TM, Tmax et Tmin (tableau IV-1). Le test *a posteriori* de Tukey a montré une variabilité significativement supérieure dans la condition AC comparé aux conditions AI et TRS. Il est à noter que la variabilité du Timp dans la condition AC est faible et ne différencie pas significativement des IV des autres conditions AI et TRS (pas d'effet courbe ni d'interaction Condition X Courbe ; tableau IV-1).

4. Discussion

L'objectif de cette étude était d'explorer les effets de la contrainte temporelle sur les APAs et sur la coordination posture / mouvement dans des tâches complexes. A notre connaissance, cette étude est la première à avoir utilisé un geste complexe sur-pratiqué impliquant tout le corps. L'absence de telles études dans la littérature est peut être la conséquence de l'idée généralement admise que les habiletés automatiques produisent des patterns similaires d'un essai à un autre. Par conséquent, en ayant à l'esprit que les APAs sont solidement liés à l'activité focale, on supposait probablement que le comportement des APAs et l'activité focale resterait stable au travers des conditions. Cependant, les données de la littérature ont montré que la coordination des effecteurs impliquant le haut et le bas du corps est affectée par la contrainte temporelle (Paillard *et al.*, 1990). Des résultats similaires ont été

démontrés sur la tâche largement étudiée de soulèvement de bras impliquant des APAs (Nougier *et al.*, 1999). Il restait donc à démontrer si ces comportements peuvent être observés sur des tâches automatiques et complexes.

4.1. Validité des forces de réaction au sol comme un indice des APAs

L'utilisation des enregistrements EMG sur des tâches complexes ne peut rendre compte de la totalité des muscles impliqués dans le mouvement ; un muscle non enregistré peut toujours produire des APAs. Inversement, toute activité d'un muscle postural devrait produire des forces d'appui au sol. C'est probablement pour cela que certaines études ont évalué les APAs à l'aide d'une plateforme de force et l'EMG du muscle focal (Do & Yiou, 1999) ou seulement à l'aide d'une plateforme de force (Yiou *et al.*, 2007). Toutefois, nous avons utilisé *a posteriori* les données de l'étude 2 pour vérifier si les enregistrements de la plateforme de force sont représentatifs de l'activité des APAs de certains muscles posturaux. Dans cette étude (étude 2) dix sujets exécutaient le mouvement de soulèvement de bras (cf. Nougier *et al.*, 1999 ; étude 2) sur une plateforme de force avec un accéléromètre attaché au niveau du poignet ; des données EMG ont été recueillies sur trois muscles posturaux : Gastrocnémien, Tenseur du Fascia Latae et le Semi-Tendineux ; et le Deltoïde antérieur comme muscle focal principal. Ensuite des délais ont été calculés selon les mêmes procédures utilisées dans cette expérience. Tel qu'attendu, les résultats ont montré que le début de l'activité des muscles posturaux et des FRS (en X, Y et Z) précèdent le début de l'activité du deltoïde antérieur. De plus, des délais entre le début des APAs et l'activité focale ont été calculés entre les muscles posturaux et le deltoïde antérieur et entre les FRS et les accélérations au niveau du bras. Il s'avère que la corrélation calculée entre ces délais (EMG vs FRS) est significative ($r = .78, p < .007$). Par conséquent, il existe une relation étroite entre l'activité EMG, mouvement du corps et FRS dans ce type de mouvement simple. Cependant, la variance trouvée (39 % de la variance total) est probablement due à l'implication dans le mouvement de certains muscles qui n'ont pas été mesurés. Ces résultats et observations soutiennent la validité des données obtenues avec une plateforme de force et un accéléromètre lorsqu'ils sont utilisés comme indices de schémas posturo-cinétiques, particulièrement pour des tâches complexes.

4.2. Modulation du DFA et complexité de la tâche

Selon la théorie de la capacité posturo-cinétique (Bouisset & Le Bozec, 2002), dans une tâche motrice la performance de l'activité focale dépend particulièrement de la capacité des composantes posturales à développer une dynamique anticipée efficace (Yiou *et al.*, 2007). Par conséquent, une tâche complexe devrait engendrer des délais plus longs entre le début des APAs et le début de l'activité focale. Cela semble évident lorsqu'on compare nos résultats à ceux obtenus à partir de tâches simples (Benvenuti *et al.*, 1997; De Wolf *et al.*, 1998; Nougier *et al.*, 1999; Slijper *et al.*, 2002). Par exemple, nos résultats ont montré des délais minimums de 50 et 100 ms (dans les conditions TRS et AI respectivement) qui sont beaucoup plus élevés que les délais maximums (30 et 50 ms respectivement) observées par Benvenuti *et al.* (1997) ou Nougier *et al.* (1999).

Cependant, il est possible de considérer que l'augmentation de ces délais est due aux paramètres utilisés. En effet, des études antérieures ont utilisé des enregistrements EMG pour calculer les délais ; tandis-que dans la présente expérience les délais ont été calculés entre le début des FRS et le début des accélérations du membre focal. Ces différences dans les protocoles expérimentaux ne devraient pas avoir un impact sur les délais. D'abord, les FRS sont les conséquences de la transmission des forces internes et moment de force (activité musculaire) à travers l'ensemble du corps, à la surface d'appuis. Ensuite, le déplacement du membre lanceur est le résultat de la contraction des muscles du bras. Par ailleurs, Bard *et al.* (1992) ont montré que les délais séparant le début d'activation du doigt et du talon sont similaires lorsqu'ils sont mesurés à partir de l'activité EMG ou à partir de réponses mécaniques. De plus, comme indiqué précédemment, la corrélation significative enregistrée entre les délais FRS-vs-Accélération et EMG posturaux-vs-delhoïde antérieur montre la relation étroite qui existe entre l'activité EMG et les FRS. Donc, la complexité de la tâche semble être la meilleure explication de l'allongement des délais dans cette étude, lorsqu'elle est comparée à d'autres études impliquant des tâches simples.

4.3. Changement dans le « timing » entre le début de l'activité posturale et le début de l'activité focale

Les conditions expérimentales (TRS, AC, AI) modifient la coordination du lancer. Ces modifications entre les conditions ont été observées en dépit de la similarité dans les instructions données aux sujets concernant le lancer en lui-même. Ainsi, comme attendu, les

contraintes temporelles influencent la coordination entre les activités posturale et focale. Ceci se manifeste particulièrement dans le délai (DFA) séparant le début de l'activité posturale et le début d'activité du membre impliqué directement dans le mouvement (activité focale). Il est à rappeler que dans les trois conditions, les FRS précèdent les accélérations enregistrées au niveau du poignet, ce qui démontre la présence d'une activité posturale anticipatrice (APAs).

Les DFA significativement plus courts enregistrés dans la condition TRS comparés aux DFA des conditions AC et AI indiquent, comme le modèle de Paillard *et al.* (1989) prévoie, un déclenchement quasi simultané des commandes centrales du mouvement (composantes posturale et focale). Par conséquent, il semble que le programme moteur, impliquant une seule commande motrice incluant l'activité des muscles posturaux et focaux est établi dans la condition TRS. Ce résultat est compatible avec le modèle hiérarchique qui prédit que les APAs et l'activité focale ont des conséquences périphériques différentes d'une seule et unique commande centrale (Aruin & Latash, 1995a).

Il est également intéressant d'indiquer que la séquence d'activation des FRS en fonction des trois axes est similaire entre les conditions. Cependant, dans la condition TRS, l'activation survient presque simultanément (dans un intervalle de 17 ms) sur les trois plans du mouvement (sagittal, frontal, vertical) et en synchronisation avec le début d'accélération du bras. Ainsi, le début de l'activité focale se produit dans le même temps avec l'activité posturale, permettant un déplacement simultané du corps dans les trois plans. Comme interprété par Nougier *et al.* (1999), ceci impliquerait un mécanisme préréglé où la spécification des paramètres des différents muscles survient presque simultanément. Riehle et Requin (1989) ont montré un mécanisme similaire sur des singes. Ils ont observé qu'une augmentation progressive de l'excitabilité des neurones impliqués dans la programmation spécifique de la direction du mouvement est reliée au signal de réponse et est corrélée au temps de réaction. Ceci soutient l'idée d'une programmation consistant en un assemblage de processus séparés ayant différentes durées (Riehle, 2005). De façon similaire, le fait que les APAs et l'activité focale n'apparaissent pas dans le même temps dans les conditions AC et AI, suppose que les APAs sont programmés avant le mouvement focal et peuvent être considérés comme un processus séparé de celui-ci. Par conséquent, dans la condition réactive, le comportement observé est compatible avec le modèle de coordination hiérarchique entre posture et mouvement (Massion, 1992, 2004), tandis-que le comportement dans les conditions

AI et AC indique l'implication d'un modèle Parallèle. La discussion qui suit vise à éclaircir davantage cette idée.

Contrairement à la condition TRS, les conditions AC et AI n'impliquent pas une forte pression temporelle car le stimulus de déclenchement en AC est prédictible et la situation auto-initiée suppose une pression temporelle nulle. Par conséquent, il semble logique que les APAs surviennent plus tôt pour permettre une régulation anticipée de la perturbation causée par le mouvement (Massion, 1992). Ceci est appuyé par le fait que les FRS précèdent largement le début d'activation du membre impliqué directement dans le mouvement (focal) et par le fait que ces forces surviennent distinctement l'une après l'autre. La première activation est observée sur le plan sagittal (axe Y) suivie par une activation sur l'axe frontal (X) et enfin, une activation sur l'axe vertical (Z). De façon similaire, Nougier *et al.* (1999) ont rapporté que les muscles posturaux sont activés l'un après l'autre dans la condition AI, tandis que ces muscles sont activés presque simultanément dans la condition TRS. Puisque le mouvement est produit principalement dans l'axe antéropostérieur ou sagittal (Y), il est logique de penser que les APAs sont liés à la perturbation à venir qui va être provoquée par l'activité focale. Ceci suppose donc une programmation de l'activité posturale qui prend en compte l'amplitude de la perturbation attendue en fonction de la direction du mouvement.

Toutefois, puisque les déplacements importants sur le plan sagittal (Y) sont certainement reliés à l'armé du bras, on pourrait alors supposer que les différences enregistrées entre les conditions étaient les conséquences de modifications survenues au niveau de l'action du bras et pas à une modification dans l'organisation centrale des commandes. Quelques données de la littérature fournissent certains arguments contre cette hypothèse. Lee *et al.*, (1987) ont montré que le « timing » des APAs dans une flexion rapide du bras n'est pas relié à l'amplitude de l'accélération du bras. Ils ont également montré que l'ordre de recrutement des muscles posturaux et focaux est plus influencé par ce qu'ils ont appelé « les conditions comportementales » (elles consistent en une flexion auto-initiée et une flexion déclenchée par un signal externe constitué d'une cible en mouvement qui s'active après une période préparatoire variable) que par les conditions mécaniques de la tâche (vitesse du bras). Ultérieurement, Nougier *et al.* (1999) avaient montré que les APAs surviennent plus tôt dans la condition auto-initiée que dans la condition TRS, malgré que les accélérations du bras fussent contrôlées pour qu'elles restent constantes au travers des essais et conditions.

Nous n'avons pas trouvé une expérience examinant les APAs dans une condition d'anticipation-coïncidence tel que celle utilisée dans cette étude. Néanmoins, en terme de programmation motrice, il semble que les APAs et l'activité focale sont générées par deux commandes distinctes (modèle parallèle, Massion, 1992). Pour coordonner les APAs et l'activité focale, le SNC retarde l'envoi de la commande générant l'activité focale (Slijper *et al.*, 2002; Bazalgette, Zattara, Bathien, Bouisset, & Rondot, 1987). Ceci ne remet pas en cause l'idée que les APAs sont générés en anticipation par rapport au mouvement focal pour minimiser les perturbations posturales durant l'exécution du mouvement, mais suppose que l'organisation temporelle des commandes est modifiée. Les afférences parvenant des muscles posturaux et focaux devraient contribuer au timing des deux commandes (Paillard *et al.*, 1989; Bard *et al.*, 1992; LaRue, 2007). Les conséquences sensorielles du mouvement planifié sont attendues conformément à « l'image du but » ; ainsi, les afférences sensorielles concernant la posture fournissent le timing exact du début du mouvement focal.

4.4. Différences dans les processus préparatoires entres les conditions AI et AC

Nos résultats indiquent que le SNC peut varier le timing des commandes posturale et focale pour faire face aux différentes conditions de pression temporelle et montrent également qu'il existe au moins deux modes de contrôle pour l'exécution d'un mouvement intentionnel. Un mécanisme préréglé qui contrôle l'activité motrice sous les contraintes temporelles fortes (TRS), et un mécanisme de prétraitement qui intervient lorsque la contrainte temporelle est faible (condition AI) ou intermédiaire (condition AC). En considérant qu'il n'existe pas de différences significative entre les conditions AC et AI, peut-on considérer que les comportements dans ces conditions sont similaires ? Dans les deux conditions, le mouvement est contraint par l'image du but et par l'implication d'un mécanisme de prétraitement (programmation totale ou partielle ; Riehle & Requin, 1989). Cependant, la programmation du mouvement est probablement partielle dans la condition AC car une évaluation des conditions internes et externes sont nécessaires pour assurer un ajustement continu en relation avec le déplacement du mobile (Tresilian, 1995 ; LaRue, 2007). La programmation partielle est soutenue par la grande variabilité enregistrée dans la condition AC sur toutes les variables. Ceci est probablement lié au fait que les sujets ajustent les déplacements des segments corporels en relation avec le déplacement du mobile ; tandis qu'ils programment totalement leur réponse dans la condition AI et développent des patterns précis des paramètres du mouvement. Cette interprétation est soutenue par les changements observés sur l'indice de

variabilité : une variabilité élevée est compatible avec la stratégie de l'anticipation-coïncidence consistant à un ajustement de la posture et du déplacement des segments corporels en relation avec le changement de la position du mobile, donc les sujets modifient leurs comportements durant le lancer sur chaque essai.

De même, LaRue (2007) avait trouvé quelques différences entre les conditions AC et AI. Cette différence a été attribuée à l'augmentation de la variabilité dans la condition AC au niveau de la perception anticipée de la collision entre le mobile visuel et la cible temporelle, ou au possible conflit entre les processus perceptivo-moteurs impliqués avec ceux qui ajustent le déclenchement de la commande motrice.

4.5. Comment les contraintes temporelles influencent-elles les patterns posturaux et focaux ?

Il semble que les contraintes temporelles influencent davantage l'activité posturale que l'activité focale. D'un côté, les caractéristiques temporelles du mouvement du bras sont similaires au travers des trois conditions comme c'est montré par l'absence de différences significatives sur les variables temporelles (TM, Tmax, Tmin et Timp) et les amplitudes des courbes d'accélération du bras. De l'autre côté, il existe des différences significatives entre les conditions sur les variables temporelles des FRS. En considérant ces deux paramètres au même temps, on peut suggérer que les conditions de la contrainte temporelle affectent principalement l'activité posturale. De façon similaire, Nougier *et al.* (1999) ont comparé les APAs dans une tâche de soulèvement de bras dans une condition auto-initiée et une condition de TRS, la latence des APAs était plus large dans la condition AI que dans la condition TRS. Dans cette expérience, le soulèvement de bras était exécuté à une vitesse presque constante (80 %) entre les essais et conditions, et la similarité du mouvement du bras en termes d'amplitude et de timing était contrôlée par un oscilloscope. Lee *et al.* (1987) ont montré que l'ordre de recrutement des muscles posturaux et focaux était plus influencé par les conditions de pression temporelle que par les exigences mécaniques de la tâche en termes de vitesse.

Conclusion

Cette étude confirme l'existence de différentes stratégies temporelles pour la préparation et le déclenchement de mouvements intentionnels en relation avec la pression temporelle imposée par la situation. Elle confirme que la situation d'anticipation-coïncidence

constitue un niveau intermédiaire de contrainte, entre les conditions réactive (TRS) et auto-initiée. De plus, cette étude élargie les données de la littérature sur des tâches complexes, telles que celles rencontrées dans les activités sportives, nécessitant des actions coordonnées de tout le corps. Accessoirement, nos données ont montré la validité de l'utilisation de la plateforme de force pour l'étude de la coordination des tâches complexes.

A notre connaissance, cette étude est la première à fournir des données sur les APAs lors de l'exécution d'un mouvement complexe dans une tâche d'anticipation-coïncidence. Bien que la condition AC produise des comportements proches de ceux observés dans la condition AI, il est à indiquer que la grande variabilité observée dans la condition AC suggère en partie des stratégies ou des processus préparatoires différents de ceux observés dans la condition AI. Des études supplémentaires sont nécessaires pour identifier et quantifier ces processus.

Chapitre V. Modulation des APAs dans une tâche d'anticipation-coïncidence.

1. Introduction

Les mouvements impliquant la stabilité du corps sont accompagnés par des ajustements posturaux anticipateurs (APAs). Déclenchés par un mécanisme de contrôle en « feed-forward », ils visent à minimiser les perturbations provoquées par le mouvement volontaire (Massion, 1992). Puisque ces ajustements précèdent le début du mouvement focal, ils sont qualifiés d'anticipatoires. On les observe facilement en position érigée lors de mouvements de soulèvement de bras (Belenkii *et al.*, 1967 ; Cordo & Nashner 1982 ; Horak *et al.*, 1984 ; Bouisset & Zattara 1987 ; Nougier *et al.*, 1999, Cuisinier *et al.*, 2005) ou lors d'un délestage (ou lestage) d'un membre (Aruin & Latash 1995a, 1996). Cependant, l'amplitude et le timing des APAs sont modifiés en fonction des conditions imposées par l'expérimentateur : vitesse du mouvement, l'inertie à vaincre, mode de déclenchement, perturbation provoquée volontairement ou par l'expérimentateur.

C'est ainsi qu'on a pu observer des différences dans les APAs et dans la coordination entre les APAs et le mouvement focal lorsque le mouvement est déclenché sous différentes conditions de pression temporelles. En effet, les APAs commencent plus tôt et durent plus longtemps lorsque le mouvement est auto-initié (AI) que lorsque le mouvement est exécuté en réponse à un signal externe (Benvenuti *et al.* 1990, 1997 ; De Wolf *et al.*, 1998). De plus, les muscles posturaux sont activés presque simultanément en condition réactive, tandis qu'ils sont clairement activés l'un après l'autre en condition AI (Nougier *et al.*, 1999).

Ces modifications de coordination sont-elles dues aux différences dans le mode de déclenchement (instruction : réactive, prédictive) ou au temps disponible qui précède l'exécution du mouvement ? Quelques éléments de réponse ont été fournis par l'étude de Slijper *et al.* (2002). Les auteurs avaient observé une coordination posture / mouvement similaire entre une situation de temps de réaction de choix (TRC) et une situation AI. L'allongement du temps de réaction en situation TRC augmente le temps pré-moteur permettant aux APAs de survenir plus tôt par rapport au mouvement focal. Il existe une corrélation entre la latence des APAs et le temps de réaction. Cuisinier *et al.* (2005) ont également observé une augmentation de la latence des APAs avec l'augmentation du temps pré-moteur. Ces résultats sont plutôt en faveur d'un lien étroit entre le temps disponible pour

la préparation du mouvement et la modulation des APAs. Cependant, dans ces études, l'augmentation du temps de réaction était naturellement causée par la présence de plusieurs alternatives de réponses, ainsi il paraît difficile de penser qu'il s'agit bien là d'une variation du temps disponible pour préparer le mouvement focal et les APAs.

L'utilisation de tâches d'anticipation-coïncidence donne la possibilité de manipuler le temps précédant l'exécution du mouvement. Par exemple, lorsqu'on demande au sujet d'intercepter (« catching ») différentes charges lâchées à partir de différentes hauteurs, la durée du vol avant le contact est naturellement variée. Dans ces expériences, les sujets étaient debout bras à l'horizontal, la charge arrivait droit sur la main sans aucun déplacement des membres. Des APAs ont été observés au niveau des muscles du bras (Lacquaniti & Maioli, 1989 ; Shiratori & Latash, 2001 ; Aruin *et al.*, 2001), du tronc et des membres inférieurs (Lavender *et al.* 1993 ; Shiratori & Latash, 2001 ; Aruin *et al.*, 2001). Aruin *et al.* (2001) ont remarqué que le début des APAs ne dépend pas de la hauteur du lâché (donc de la durée du vol) lorsque le sujet auto-initie le lâché de la charge (auto-lâché). En revanche, ils ont remarqué une modulation des APAs lorsque le sujet n'a pas le contrôle du lâché, mais seulement entre la plus petite (0,1 m) et la plus grande hauteur (0,4 m). Les auteurs ont suggéré que la condition où l'expérimentateur lâche la charge à une hauteur de 0.1 m équivaut à une condition réactive tel que démontré par l'apparition tardive des APAs. La durée entre le lâché de la charge et le contact dans cette condition étant court, celle-ci rend difficile l'anticipation. Inversement, en raison de l'apparition précoce des APAs dans les conditions auto-lâchés, les auteurs ont suggéré une similarité de ces comportements avec la situation auto-initiée. De manière similaire, Larue (2007) avait observé des coordinations (synchronisation doigt-talon) équivalentes entre une condition d'anticipation-coïncidence (AC) et une condition AI.

Dans les manipulations utilisant le « catching », il faut souligner que les sujets sont appelés à réagir à une perturbation attendue, sans aucun mouvement apparent de leurs parts. C'est peut être la raison pour laquelle Aruin *et al.* (2001) n'ont pas observé de modulation des APAs en fonction de la durée de vol dans la situation auto-lâchée. On peut donc se demander ce qu'il adviendrait si les sujets étaient appelés à agir, en provoquant une perturbation à la suite d'un déplacement volontaire d'un membre.

L'objectif de cette étude est donc d'examiner les APAs et la coordination posture / mouvement en variant le temps de préparation d'une action motrice impliquant un déplacement rapide d'un membre. Une tâche d'anticipation-coïncidence semble la plus appropriée pour manipuler le temps précédent le mouvement. Cela nous permettrait d'explorer davantage la modulation des APAs sur le mode de déclenchement en AC.

Il serait également intéressant dans un deuxième temps de comparer ces comportements aux modes réactif et auto-initié. Les comportements « temporels » observés dans la situation AC de l'étude 1 sont intermédiaires aux conditions réactive et auto-initiée. Mais les résultats statistiques n'ont pas montré d'effets significatifs entre les conditions AC et AI (excepté la variabilité). Dans la situation AC de l'étude 1, les sujets disposaient de suffisamment de temps pour juger la vitesse du mobile et anticiper aisément la coïncidence du mobile avec la cible. De plus, la consigne donnée était de synchroniser l'impact de la balle avec le passage du mobile sur la cible. Donc, la pression temporelle influencerait plus le lâché de la balle (fin du mouvement) que le début du mouvement. Ces deux paramètres rapprocheraient la condition AC de la condition AI. Il est possible d'observer un mode de coordination différent lorsque les sujets doivent synchroniser le début du mouvement au stimulus.

Nous posons comme hypothèse qu'il y a une gradation des APAs en fonction du temps disponible pour l'exécution du mouvement. Ainsi, plus le temps de déplacement du mobile est court plus les comportements en AC seraient proches de la situation réactive. Inversement, plus le temps de déplacement du mobile est long plus les comportements en AC seraient proches de la situation auto-initiée. Si cette hypothèse était rejetée cela signifierait un mode de coordination spécifique au mode de déclenchement en AC.

2. Méthode

2.1. Sujets

Dix sujets masculins (8 droitiers et 2 gauchers) ont participé à l'expérience. La moyenne d'âge était de 27.3 ans (ET = 4.2). Les sujets n'avaient aucun antécédent de problème neuromusculaire et leur acuité visuelle était normale. Ils ont signé un formulaire de consentement approuvé par le service « Sécurité & Santé » de l'université d'Orléans.

2.2. Tâche

La tâche est similaire à celle utilisée par Nougier *et al.* (1999). Elle consiste en une flexion unilatérale de l'épaule en soulevant le bras avec une charge additionnelle jusqu'à l'horizontale. Trois modes de déclenchement ont été testés :

- (1) déclencher le mouvement le plus rapidement possible en réponse à un signal externe lumineux ;
- (2) déclencher le mouvement en synchronisant le début ou la fin du mouvement avec le passage d'un mobile visuel sur une cible (tâche d'anticipation-coïncidence);
- (3) auto-initier le déclenchement du mouvement.

2.3. Matériel

Les sujets ont été testés sur une plateforme de force de type KISTLER™ (modèle : 9286A, reliée à un amplificateur, modèle : 9865E) nous permettant d'avoir trois composantes de la force et de moment de force (verticale Z, sagittal Y et frontale X).

Afin d'augmenter la perturbation posturale, une charge additionnelle de 500 g, sous forme d'un bracelet, est attachée au niveau du poignet. Les accélérations du bras ont été enregistrées simultanément avec un accéléromètre mono-axial (Biopac, TSD109F) fermement attaché à la face dorsale de la main préférentiel autour du bracelet.

Des électrodes de surface bipolaire Ag-AgCl (3,5 cm) ont été utilisées pour l'enregistrement de l'activité EMG du *Déltoïde Antérieur* (DA), considéré comme le principal muscle responsable du mouvement focal, et des muscles posturaux : le *gastrocnémien* (GA) et le *semi-tendineux* (ST) ipsi-latéraux, et le *tenseur du Fascia Latae* (TFL) contra-latéral. Des études antérieures (Nougier *et al.*, 1999; Bouisset & Zattara, 1987) ont montré que ces muscles posturaux sont impliqués dans les APAs lors de mouvements de soulèvement de bras. Les signaux EMG ont été amplifiés par un facteur 1000 (Bioamplifier™, model 2122) avec un filtre passe bas à 500 Hz.

Avant chaque essai, les sujets mettaient la main en contact avec une plaque métallique ajustée à la hauteur de la main (bras le long du corps). La rupture du contact envoie un signal TTL permettant, en plus de l'accéléromètre, de détecter le début du mouvement. Un autre signal TTL est généré lorsque la main du sujet coupe un faisceau lumineux intercepté par une

cellule photoélectrique ajustée à la hauteur du bras du sujet lorsqu'il est à l'horizontale. Une lamelle flexible était rajoutée au niveau de la diode pour permettre aux sujets de percevoir, grâce à une sensation kinesthésique, l'arrivée au niveau requis.

En condition réactive, une LED (Light Emitting Diode) rouge ($\varnothing$ 0.4 cm) a été introduite dans un petit trou percer au milieu d'un panneau (50X50 cm) dont la hauteur a été ajustée de façon à ce que la LED se retrouve à hauteur des yeux. Par contre, la distance reste fixe à 180 cm du bord avant de la plateforme de force. Un écran a été utilisé en remplacement du panneau (hauteur, distance) dans la condition d'anticipation-coïncidence pour animer le signal de réponse (figure V-1). La scène animée consiste en une ligne horizontale verte, tracée sur fond noir au milieu de l'écran, délimitant la trajectoire du mobile. Ce dernier (mobile) est constitué d'une barre verticale rouge (4 cm) qui se déplace à une vitesse constante et passe par une cible (barre bleue sur la figure) située à l'extrémité droite de la ligne horizontale. La durée de la trajectoire avant la cible varie selon la condition (720, 1200, 3000 ms).

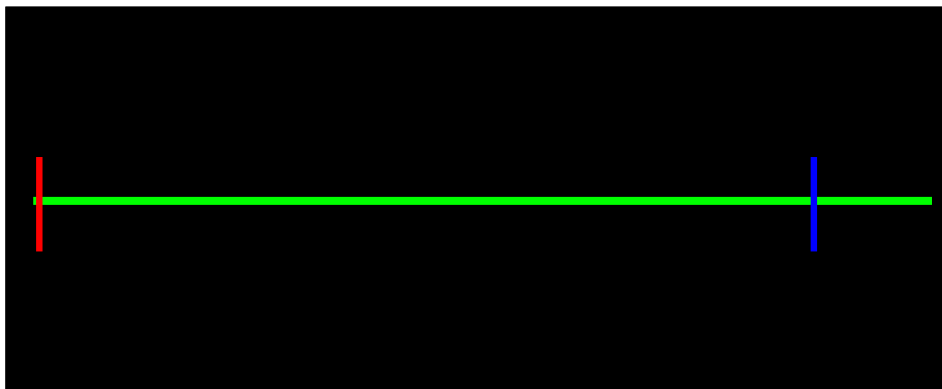


Figure V-1 : *Stimulus utilisé dans la tâche d'anticipation-coïncidence (explications dans le texte).*

Tous les signaux ont été enregistrés simultanément grâce à un programme élaboré sous Matlab™ (R11) avec une carte d'acquisition A/D (model CIO-DAS1602, résolution 16 bits) à une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz.

2.4. Procédure

Les sujets ont été testés individuellement en une seule session. En position initiale (figure V-2), les sujets se tiennent debout sur la plateforme de force, les bras en adduction le long du corps. La charge est attachée au poignet de la main préférentielle du sujet. Les pieds

étaient placés à la largeur de la hanche. Un marquage de la position des pieds sur la plateforme de force était effectué pour garder la même position des appuis au cours de l'expérience (essais, conditions).

Une fois que les sujets ont mis la main en contact avec la plaque métallique et stabilisé leur posture, ils devaient soulever le bras à l'horizontale (jusqu'à la lamelle) avec le maximum de vitesse dans trois conditions de contrainte temporelle. (1) en condition réactive, les sujets devaient répondre le plus rapidement possible à l'allumage de la diode (durée d'occurrence : 80ms). C'est une situation de temps de réaction simple (**TRS**). Le signal apparaît aléatoirement sur une période de 8 secondes ; (2) en condition auto-initiée (**AI**) ; les sujets disposaient d'un intervalle de 10 secondes pour déclencher le mouvement à leur convenance ; (3) en condition d'Anticipation-Coïncidence (**AC**) deux situations étaient requises : (a) synchroniser le début du mouvement avec le passage du mobile visuel sur la cible (**ACDeb**), (b) synchroniser l'arrivée du mouvement avec le passage du mobile visuel sur la cible (**ACFin**). Pour chacune des situations d'**AC**, le temps avant la cible (**Tac**) était varié (720, 1200, 3000 ms) en modifiant la vitesse du déplacement du mobile (la distance du déplacement du mobile reste constante). L'ensemble des conditions sont présentées sur le tableau V-1.

Les sujets étaient maintenus dans l'ignorance des objectifs de l'étude et découvraient les conditions expérimentales au fur et à mesure. La présentation des conditions était contrebalancée entre les sujets ainsi que le **Tac** (court → long ; long → court). Quelques essais de familiarisation étaient exécutés avant chaque condition expérimentale. Pour chacune des conditions 20 essais valides étaient recueillis.

Tableau V.1 : Rappel des conditions expérimentales et leurs significations.

Conditions			
1	TRS	temps de réaction simple	
2	AI	Auto-initiée	
	AC	Acticipation-coïncidence	
		Synchronisation	Temps avant la cible
3	ACDeb720	Début	720
4	ACDeb1200	Début	1200
5	ACDeb3000	Début	3000
6	ACFin720	Fin	720
7	AcFin1200	Fin	1200
8	ACFin3000	Fin	3000

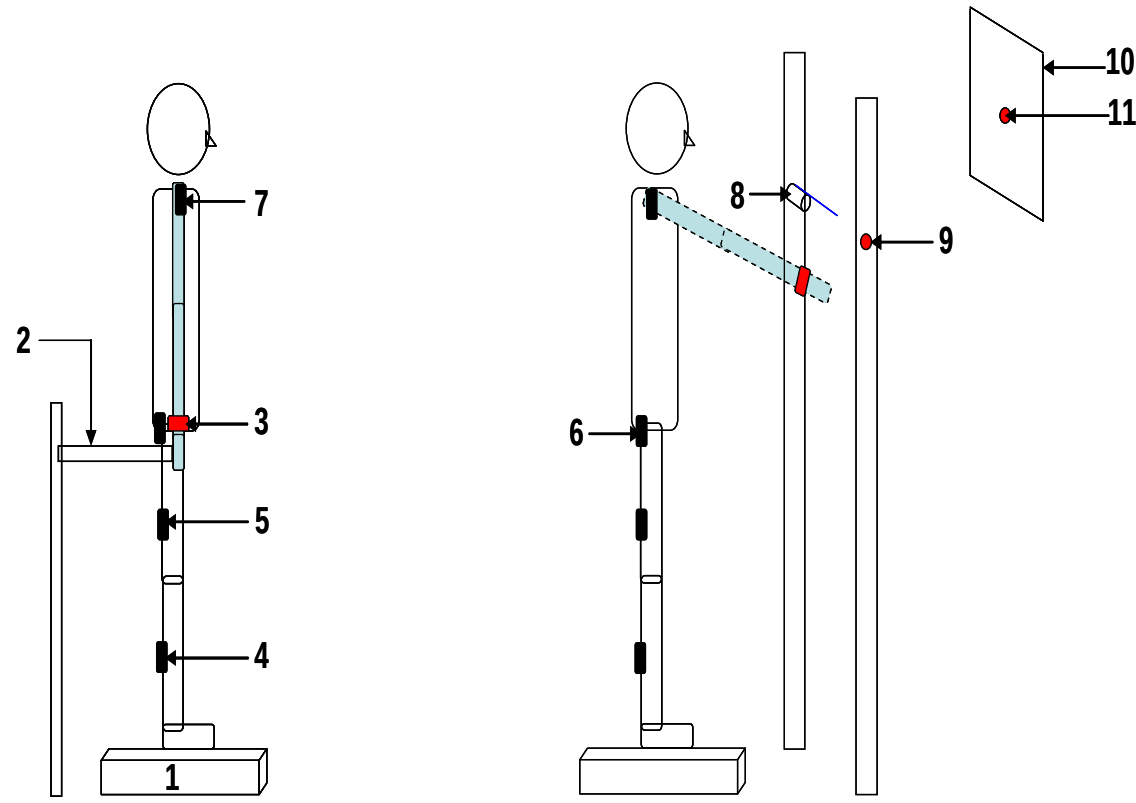


Figure V-2 : Illustration du dispositif expérimental

Vue latérale d'un sujet droitier en position initiale (gauche) et pendant l'exécution du mouvement (droite) de flexion unilatérale de l'épaule. En position initiale, les sujets se tiennent debout sur la plateforme de force (1), la main au contact de la plaque métallique (2). La charge additionnelle ainsi que l'accéléromètre sont placés au niveau du poignet (3). Les signaux EMG sont enregistrés sur les muscles suivants : Gastrocnémien (4), Semi-Tendineux (5), Tenseur Fascia Latae (6) et Deltoïde Antérieur (7). Une lamelle et une cellule photoélectrique (8) sensible aux changements de l'intensité de la lumière sont installées à hauteur de l'épaule. Le sujet doit atteindre cette hauteur et couper ainsi un faisceau lumineux émis par une ampoule (9). Une planche (10 : 50X50 cm) est placée à 180 cm du sujet, elle sert de support pour la diode (11) qui envoie le signal de départ en condition réactive. Cette diode est située à hauteur des yeux. La planche est remplacée par un écran d'ordinateur dans la condition d'anticipation-coïncidence.

2.5. Traitement des données

2.5.1. Analyse cinématique

Les signaux TTL issues de la plaque métallique et de la cellule photoélectrique ont permis de quantifier le temps de mouvement (TM) ainsi que les erreurs de synchronisation en AC. Plusieurs paramètres de l'accéléromètre ont été déterminés. Le début de l'accélération était déterminé automatiquement par un programme élaboré sous MatlabTM. Il correspond au premier zéro de la deuxième dérivée, trouvé itérativement à partir de l'occurrence du premier

point étant supérieur au seuil défini par la moyenne + trois écart-types de l'activité basale de l'accéléromètre. Ce moment est référé au temps zéro (T_0). Les amplitudes des pics d'accélération (Pic_{min} et Pic_{max}) et leurs moments d'apparition ($TPic_{min}$ et $TPic_{max}$) par rapport à T_0 ont été également quantifiés pour vérifier la similarité dans l'exécution du mouvement d'une condition à l'autre.

2.5.2. Analyse électromyographique

Un filtre Butterworth passe-haut d'ordre 9, avec une fréquence de coupure à 60 Hz, a été appliqué aux signaux EMG pour éliminer les signaux parasites (notamment le 50 Hz). Tous les signaux étaient ensuite rectifiés. Un autre filtre Butterworth passe-bas d'ordre 3 a été utilisé à une fréquence de coupure de 35 Hz pour obtenir l'enveloppe du signal. Cette enveloppe a ensuite été utilisée pour déterminer le début du changement de l'activité EMG (cf. Lee *et al.*, 1987 ; De Wolf *et al.*, 1998 ; Slijper *et al.*, 2002).

Le début de l'activité électromyographique de chaque muscle a été déterminé de la même façon que pour les accélérations. Les essais individuels ont été vérifiés visuellement pour éviter les erreurs du marquage automatique. Il y avait moins de 6% d'essais où le marquage automatique n'était pas au bon endroit (la plupart des cas concerne le gastrocnémien). Dans ces cas, le début est déterminé manuellement. La coordination posturale vs focale était quantifiée à partir du délai séparant le début de l'activité du muscle focal (DA) au début de chacun des muscles posturaux (GA, ST, TFL). Une valeur positive signifie que l'activité posturale précède l'activité focale.

L'amplitude des APAs a été obtenue à partir de l'EMG intégré ($\int EMG$) de chaque muscle dans la fenêtre T_0 à T_0-200 ms. Cette intégrale a été ensuite rectifiée par la soustraction de l'EMG intégré de base calculée entre T_0-500 et T_0-450 ms puis multipliée par quatre (pour avoir un équivalent de 200 ms d'activité de base) (cf. Slijper *et al.* 2002).

2.5.3. Analyse du déplacement du centre de pression

Étant donné que le mouvement s'exécute principalement sur le plan sagittal, seuls les déplacements du CP sur ce plan (ΔCP_x) sont pris en compte. Les déplacements du CP sont obtenus en utilisant l'approximation $\Delta CP_x = \Delta My / F_z$ où ΔMy représente les changements du moment de force dans l'axe frontal par rapport à sa ligne de base laquelle est définie

comme la valeur moyenne entre To-500 et To-450 ms. Plusieurs variables liées à l'amplitude et à la durée du ΔCPx ont été calculées :

- (1) Le délai entre le début de ΔCPx et To (CPT0).
- (2) L'amplitude des APAs (AmpCPx), qui correspond au pic du déplacement du ΔCPx vers l'arrière (pic_{arrière}).
- (3) La durée des APAs représentée comme le délai entre le début de ΔCPx et le moment de l'apparition du pic_{arrière} (TCParrière).
- (4) Le délai entre To et le moment de l'apparition du pic_{arrière} (To-CParrière).

2.6. Analyse statistique

Les variables ont fait l'objet d'analyses de variance ANOVA & MANOVA à mesures répétées à l'aide du logiciel Statistica™ V 5.1 dans le module GLM ; des tests *a posteriori* de Tukey ont été effectués lorsque les effets étaient significatifs. Le seuil de signification statistique a été fixé à 0.05. Pour se préserver des violations des conditions de sphéricité de l'analyse de variance à mesures répétées, les niveaux de probabilité ont été ajustés selon la procédure de Greenhouse-Geisser. Pour chaque variable, l'indice de variabilité a été calculé comme l'écart-type divisé par sa moyenne. Par la suite, cet indice a été soumis aux mêmes analyses de variances utilisées pour les moyennes. Plusieurs plans factoriels ont été utilisés. Ils seront détaillés dans la partie résultats.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques mécaniques du mouvement

Pour isoler les effets de la contrainte temporelle sur les APAs, il est important de vérifier si le mouvement focal est exécuté de la même manière d'une condition à une autre. La consigne donnée aux sujets était d'exécuter le mouvement à vitesse maximale, les variables temporelles et d'amplitudes d'accélération ont donc été comparées entre les conditions.

L'analyse à mesures répétées du facteur condition (X 8) sur les variables Pic_{min}, Pic_{max}, TPic_{min} et TPic_{max} n'a pas montré d'effets significatifs ($[F_{(7,63)}=1.32, p>.25]$; $[F_{(7,63)}=0.28, p>.95]$; $[F_{(7,63)}=.76, p>.62]$; $[F_{(7,63)}=0.67, p>.69]$ respectivement). De plus, il n'y a pas d'effet

sur le temps de mouvement [$F_{(7,63)}=1.12, p>.35$], ni sur le temps moteur [$F_{(7,63)}=0.87, p>.29$] défini comme le délai entre le début de l'activité du DA et T_o .

L'absence d'effet condition sur les paramètres mécaniques du mouvement permet de penser que le mouvement est exécuté de façon similaire entre les conditions, et que les éventuelles différences qu'on pourra trouver sur les APAs seront principalement liées à la contrainte temporelle.

3.2 Caractéristiques de l'activité EMG

Les délais moyens séparant le début de l'activité des muscles posturaux (GA, ST, TFL) au début de l'activité du muscle focal (DA) sont tous positifs. Ceci témoigne du caractère anticipatoire de ces muscles. Quelque soit la condition expérimentale, l'ordre d'activation des muscles posturaux est toujours similaire (figure V-3). Le ST est toujours activé en premier, suivie du TFL et enfin le GA. Sur certains essais individuels et seulement dans les situations d'AC (<10% de l'ensemble des essais des dix sujets), le TFL s'active avant le ST. Il est à noter également que, sur quelques essais ($\approx 5\%$), le début de l'activité du DA précède le début de l'activité du GA.

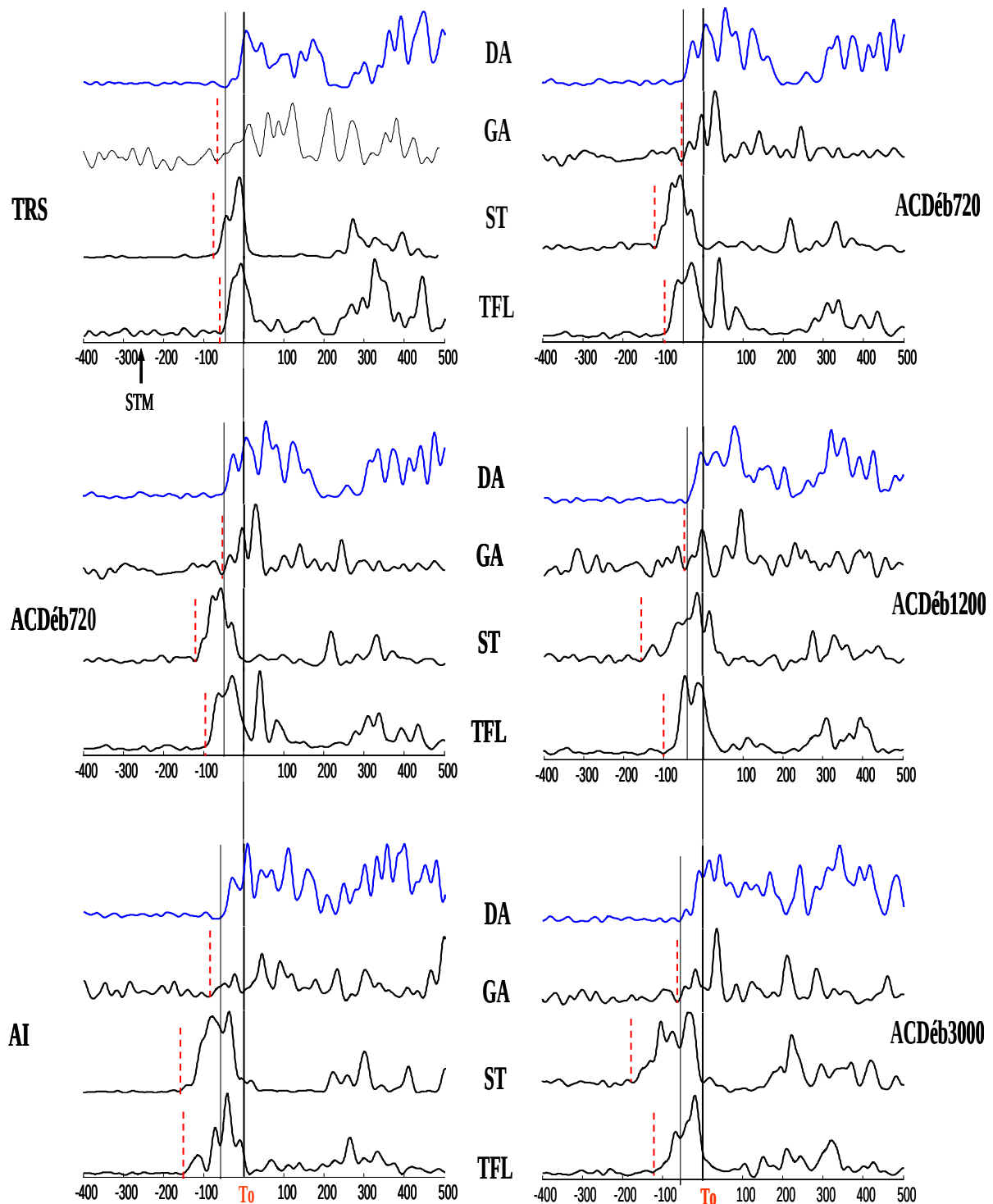


Figure V-3 : Illustration de l'activité EMG des différents muscles. Dans toutes les conditions l'activité des muscles posturaux [GA : Gastrocnémien ; ST : Semi-Tendineux ; TFL : Tenseur Fascia Latae] précède celle du muscle focal [DA : Deltoïde Antérieur]. Tous les muscles sont alignés par rapport à T_0 (début du mouvement). Sur le panneau gauche on observe la différence dans les délais Postural/Focal en fonction du mode de déclenchement (TRS : temps de réaction simple ; ACDéb720 : anticipation-coïncidence pour le **Tac** 720 ; AI : Auto-initié). Sur le panneau de droite on observe la différence dans les délais Postural / Focal en fonction du **Tac** (720 ; 1200 ; 3000ms) dans la condition AC.

3.2.1. Effets de la condition de synchronisation et de la variation du temps avant la cible (**Tac**)

De façon à vérifier si la condition de synchronisation et/ou le temps avant la cible (**Tac**) influence le délai séparant le début de l'activité de chacun des muscles posturaux (**MP**) du début du muscle focal, une MANOVA 2(Synchronisation) X 3(**Tac**) X 3(**MP**) à mesures répétées sur tous les facteurs a été réalisée. Le facteur « Synchronisation » ne semble pas affecter les délais [$F_{(1,9)} = 1.2, p > .3$]. En revanche, l'analyse a montré un effet principal du **Tac** [$F_{(2,18)} = 15.2, p < .01$] sur les délais. Le test a posteriori de Tukey a montré que les délais, pour le **Tac** 720 ms, sont significativement inférieurs aux délais observés pour les **Tac** 1200 et 3000 ms qui ne se différencient pas entre eux.

Comme l'illustre la figure V-4, il existe une interaction **Tac X MP** [$F_{(4,36)} = 9.8, p < .01$]. Le test post-hoc montre qu'il n'y a pas d'effet **Tac** sur le délai du GA. L'anticipation enregistrée sur ce muscle est très faible et varie peu d'une condition **Tac** à l'autre (9.6 ± 7.4 ms ; 13.4 ± 7.1 ms ; 13.5 ± 7.8 ms pour des **Tac** 720, 1200 et 3000 ms respectivement). En revanche, il existe un effet significatif du **Tac** sur le début de l'activité du TFL et du ST (**TFL** : 57.4 ± 17.7 ms ; 69.1 ± 21.6 ms ; 72.7 ± 25.3 ms ; **ST** : 61.6 ± 19.5 ms ; 76.6 ± 22.6 ms ; 85.1 ± 24.4 ms ; pour des **Tac** 720, 1200 et 3000 ms respectivement). Il y a une proportionnalité directe entre le **Tac** et le début de l'activité du TFL et du ST. Une analyse de tendance linéaire montre une relation proportionnelle entre le **Tac** et le délai des MP [$F_{(1,9)} = 19.8 ; p < .001$]. Cette relation se retrouve également dans une corrélation positive significative entre le **Tac** et les délais de chaque muscle [$r = .55 ; p < .001$; $r = .35 ; p < .005$; respectivement pour ST et TFL]. L'absence d'effet du **Tac** sur les délais enregistrés sur le muscle GA se répercute également sur la corrélation entre le **Tac** et le délai du GA qui n'est pas significative.

L'analyse de l'EMG intégré (JEMG) selon un plan factoriel 2(Synchronisation) X 3(**Tac**) X 3(JEMG) à mesures répétées sur tous les facteurs montre qu'il existe un effet principal « Synchronisation » sur la magnitude EMG [$F_{(1,9)} = 5.9, p < .038$]. En condition de synchronisation sur le début, l'activité EMG est significativement plus élevée que celle en synchronisation sur la fin (figure V-5A). Le facteur **Tac** influence significativement les APAs [$F_{(2,18)} = 3.8, p < .041$]. Le test post-hoc montre que la magnitude EMG enregistrée sur le **Tac** 720 est significativement inférieure à celles enregistrées sur les **Tac** 1200 et 3000. Par la

suite, nous avons procédé à une analyse de tendance linéaire pour vérifier s'il existe une relation linéaire entre le **Tac** et la magnitude EMG. Cette analyse s'avère significative [$F_{(1,9)} = 6.23, p < .03$], c'est-à-dire que plus le **Tac** est élevé plus la magnitude EMG est élevée (figure V-5B). Cependant, la corrélation entre chaque muscle et le **Tac** n'est pas significative. Cela semble logique puisqu'il n'y a pas d'interaction des facteurs **Tac** X $\int$ EMG. Enfin, nous constatons l'absence d'interactions entre les différents facteurs (Synchronisation, **Tac** et $\int$ EMG).

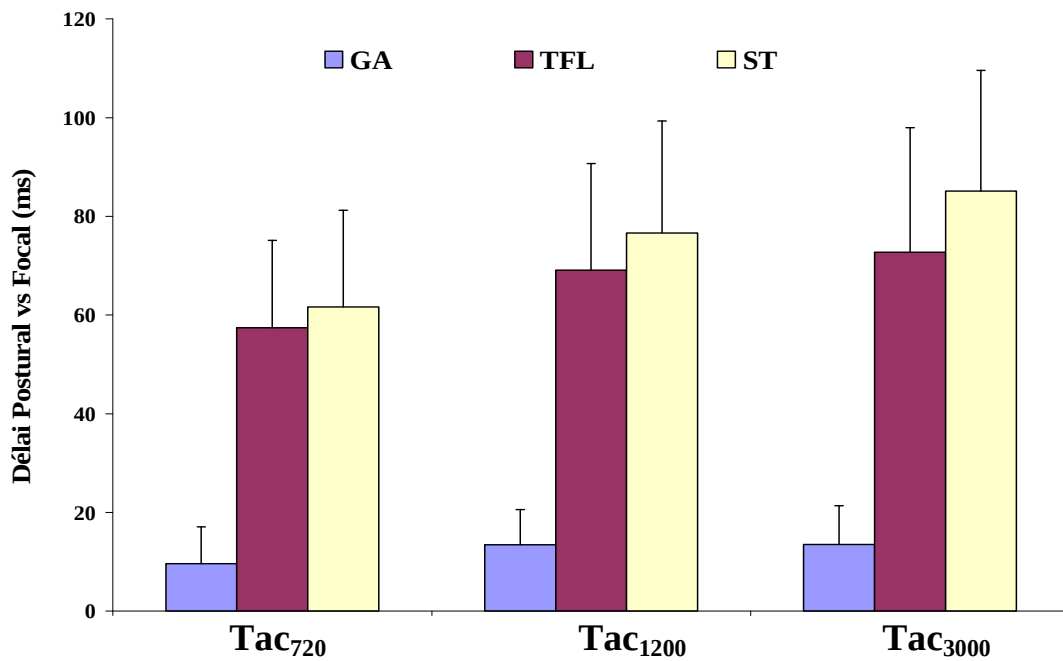


Figure V-4 : Délais moyens séparant le début de l'activité des muscles posturaux (GA : Gastrocnémien ; TFL :Tenseur du Fascia Latae ; ST : Semi Tendineux) du début de l'activité du muscle focal (Deltoïde Antérieur) en fonction du temps avant la cible (**Tac** : 720, 1200, 3000 ms).

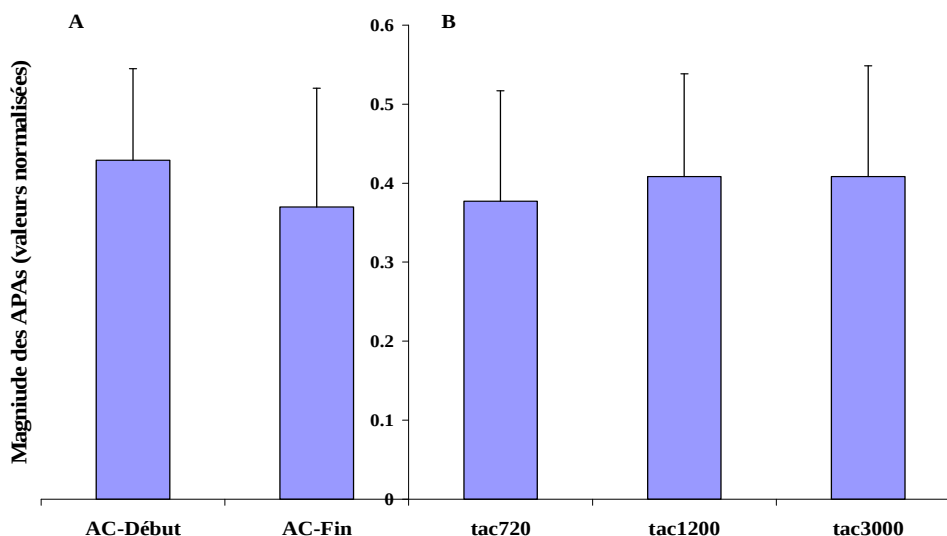


Figure V-5 : *Magnitudes relatives de l'EMG des muscles posturaux pour toutes les conditions. Les amplitudes EMG de chaque muscle et de chaque sujet ont été normalisées (entre 0 et 1) de manière à n'exprimer que les variations entre les conditions. La partie (A) montre la différence entre la synchronisation au début (AC-Début) et à la fin (AC-Fin) du mouvement. La partie (B) compare la magnitude entre les différents temps avant la cible (Tac).*

3.2.2. Comparaison des conditions d'anticipation-coïncidence (ACdébut, ACFin) à des différents Tac aux conditions réactive et auto-initiée

Dans le but de vérifier si la coordination « postural / focal » en AC peut se rapprocher de la condition réactive (TRS) ou de la condition Auto-initiée (AI) en fonction du **Tac**, une MANOVA 8(Conditions) X 3(MP) à mesures répétées a été effectuée. L'analyse a montré un effet principal Condition [$F_{(7,63)} = 22.4, p < .01$] et une interaction Condition X Délai [$F_{(14,126)} = 13.1, p < .01$]. Comme illustré dans la figure V-6, les délais les plus courts ont été enregistrés en condition réactive (TRS) suivis des délais des conditions d'AC et enfin des délais longs en condition AI. Cependant, on peut observer sur la figure V-6 que les délais dans les conditions AC s'échelonnent en fonction du **Tac**.

Une analyse post-hoc de Tukey a montré des différences significatives entre les conditions TRS et AI, et entre TRS et AC (quelque soit le **Tac** et le type de synchronisation), et enfin une différence entre AI et AC sauf pour la condition ACDéb3000. Le post-hoc réalisé suite à l'interaction des facteurs (Condition X MP) montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les conditions pour le muscle GA. En revanche, les délais enregistrés sur le

TFL et le ST en TRS sont significativement inférieurs à ceux enregistrés sur les conditions non réactives AI et AC.

La comparaison effectuée entre les conditions AI et AC a montré que les délais enregistrés sur le muscle ST sont significativement supérieurs aux délais enregistrés en AC. Par contre, pour le TFL, les délais en condition AI sont significativement différents avec les conditions où le **Tac** est égal à 720 ms seulement.

Il reste maintenant à vérifier si la magnitude des APAs est modulée en fonction du **Tac** pour se rapprocher de la condition réactive ou de la condition auto-initiée. Un plan factoriel 8 (Condition) X 3(JEMG) à mesures répétées sur le dernier facteur a été utilisé. Il existe un effet principal Condition sur la magnitude des APAs [$F_{(7,63)} = 4.1, p < .01$]. Le test *a posteriori* de Tukey a montré que la magnitude des APAs en condition réactive est significativement inférieure à la magnitude enregistrée dans les conditions AI et ACDébut (**Tac**: 1200 et 3000 ms). La comparaison post-hoc entre AI et AC a révélé que la magnitude des APAs en AI est significativement supérieure à la magnitude enregistrée en ACFin720, mais il n'existe pas de différences avec les autres conditions d'AC.

La figure V-7 montre l'interaction des facteurs Condition X JEMG, qui est également significative [$F_{(14,126)} = 3.3, p < .01$]. Comme effectuée dans le chapitre précédent, une analyse post-hoc est réalisée en comparant la magnitude de chaque muscle à travers les conditions. Pour le muscle GA, aucune différence de magnitude n'est observée entre les conditions. La magnitude du ST en condition réactive est significativement inférieure aux magnitudes enregistrées en AI et en AC, sauf pour la condition ACFin720. Une comparaison entre la condition AI et les conditions d'AC a révélé que la magnitude du muscle ST en condition AI est significativement supérieure à la magnitude enregistrée sur les conditions ACFin (**Tac** : 720, 1200 et 3000 ms), par contre, aucune différence significative n'est observée sur le reste des conditions d'AC. Concernant le muscle TFL, on observe en condition TRS une magnitude significativement inférieure à celle enregistrée dans les conditions AI et ACDébut : (**Tac** : 720, 1200 et 3000 ms). La différence de magnitude du TFL entre les conditions AI et AC n'est pas significative.

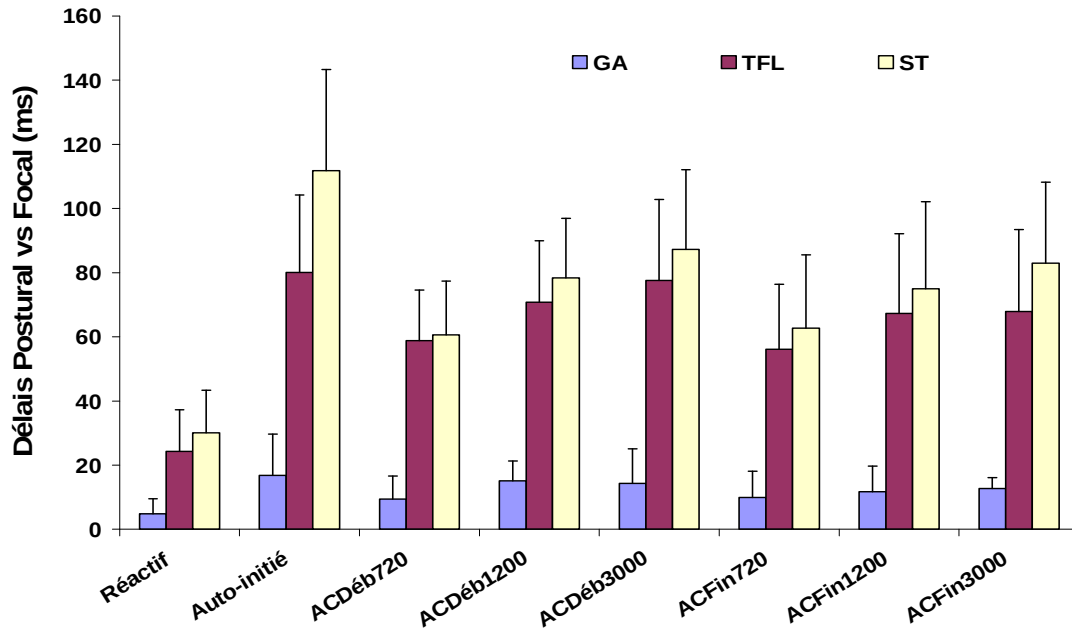


Figure V-6 : Délais moyens séparant le début de l'activité des muscles posturaux (GA : Gastrocnémien ; TFL :Tenseur du Fascia Latae ; ST : Semi Tendineux) du début de l'activité du muscle focal (Deltoïde Antérieur) dans chacune des conditions expérimentales (Réactif, Auto-initié, synchronisation au début : ACDéb, synchronisation sur la fin : ACFin. Les *tac* = 720, 1200, 3000 ms pour chacune des conditions de synchronisations). Une valeur positive signifie que le début de l'activité du muscle postural concerné précède celle du muscle focal (Deltoïde Antérieur). La figure montre bien que l'ordre d'activation des muscles posturaux est respecté quelque soit la condition.

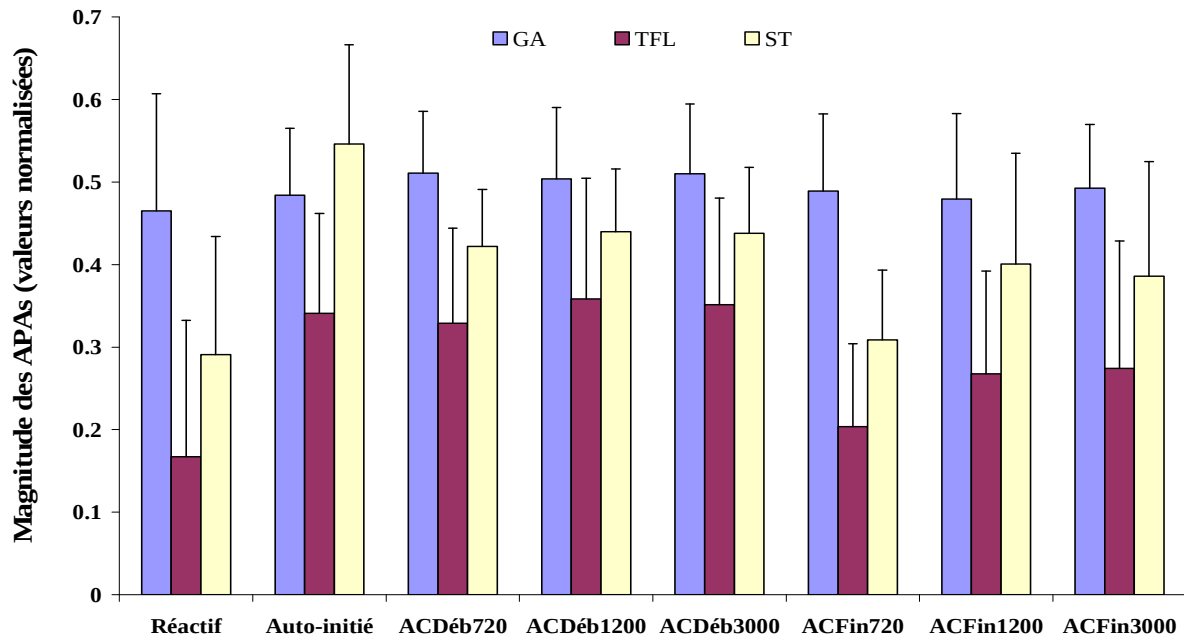


Figure V-7: Magnitude moyenne des muscles posturaux (GA : Gastrocnémien ; TFL :Tenseur du Fascia Latae ; ST : Semi Tendineux). Les amplitudes des essais individuelles ont été normalisées par muscle entre les conditions. Les valeurs sont comprises entre 0 et 1(échelle arbitraire).

3.3 Caractéristiques du déplacement du centre de pression (CP)

La figure V-8 montre les déplacements du centre de pression lors de l'élévation du bras. Les valeurs négatives signifient un déplacement du CP vers l'arrière, par rapport à sa position de base. Le déplacement du CP vers l'arrière montre le caractère anticipatoire de l'activité posturale (APAs). Il est caractérisé par deux paramètres, le pic de déplacement et la durée pour atteindre ce pic. Ces deux paramètres représentent l'amplitude et la durée des APAs respectivement. Il a été montré que ce déplacement vers l'arrière est partie intégrante de la programmation en feed-forward des APAs, étant donné qu'un déplacement passif du bras vers l'avant ne provoque pas de déplacement du CP vers l'arrière (Bleuse *et al.*, 2005, 2006). Le déplacement du CP vers l'avant est la conséquence du mouvement du bras vers l'avant qui entraîne également le centre de gravité. Ce déplacement vers l'avant du CP permet de rétablir l'équilibre postural.

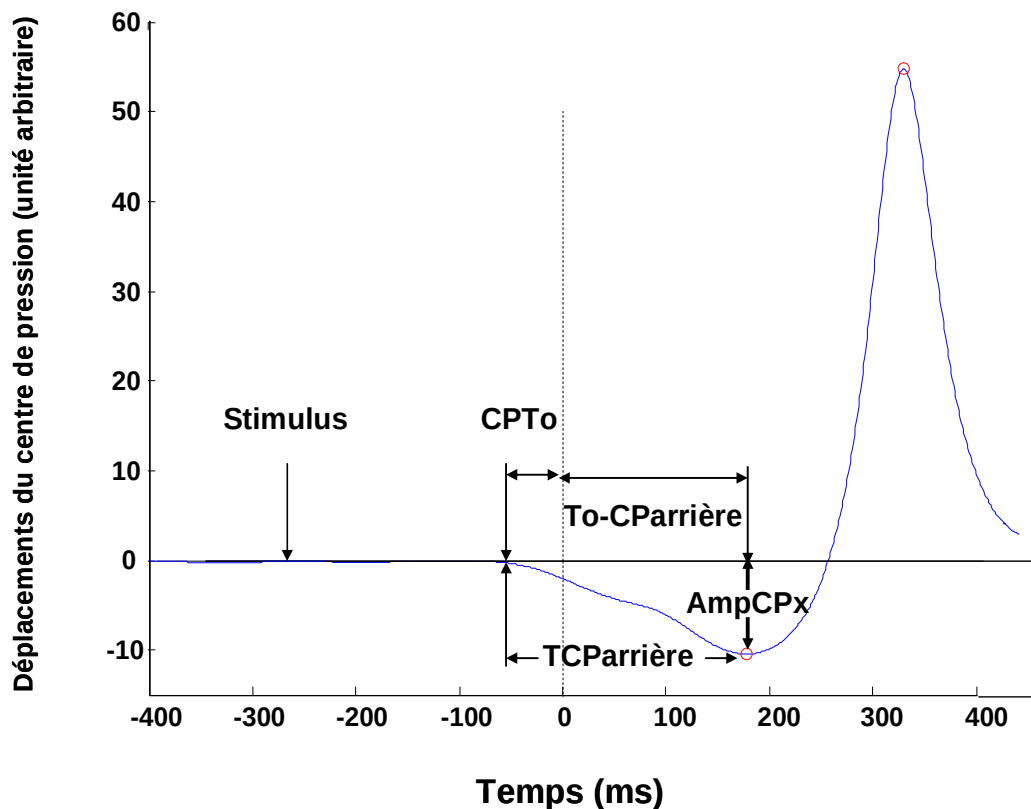


Figure V-8 : Illustration du déplacement du centre de pression (CP) sur le plan sagittal. L'essai est réalisé en condition réactive. Le signal est présenté à l'instant $t = \text{Stimulus}$. Le début de l'accélération du poignet (T_o) est représenté par la ligne verticale en pointillés. Les APAs sont caractérisés par une précession d'activité du CP sur le début de l'activité focale (CPT_o), et ceci, dans la direction opposée au mouvement (vers l'arrière). Ils durent jusqu'au $\text{pic}_{\text{arrière}}$ ($T_{c\text{Parrière}}$) (voir explication dans le texte). L'amplitude maximale des APAs (Amp_{CPx}) est quantifiée par le déplacement atteint au $\text{pic}_{\text{arrière}}$.

3.3.1. Effets de la condition de synchronisation et de la variation du temps avant la cible (tac) sur les paramètres du CP

Les variables de déplacement du CP (CPTo, TCParrière, To-CParrière, AmpCPx) ont subi une MANOVA 2(Synchronisation) X 3(**Tac**) à mesures répétées. Il y a un effet principal **Tac** sur la variable CPTo [$F_{(2,18)} = 4.4$, $p < .02$]. Le test *a posteriori* de Tukey montre que le délai (CPTo) entre le début de l'activité du CP et le début de l'accélération (To) en condition **Tac** 720ms est significativement inférieur au délai enregistré dans la condition **Tac** 3000ms. Par contre, aucune différence significative n'est enregistrée entre la condition **Tac** 1200ms et les conditions **Tac** 720 et 3000ms. La figure V-9 montre que le CPTo est fonction du **Tac**. Plus le **Tac** est élevé plus le CPTo est élevé. Une analyse de tendance linéaire confirme cette relation [$F_{(1,9)} = 13.13$; $p < .005$]. Le facteur « Synchronisation » et l'interaction « Synchronisation X **Tac** » ne montrent pas d'effets significatifs pour la variable CPTo. En revanche le facteur **Tac** n'affecte pas significativement les deux autres variables temporelles du CP (TCParrière, To-CParrière). Il n'y a pas d'effet significatif du facteur « Synchronisation » sur la durée totale du déplacement du CP vers l'arrière (TCParrière), ni sur la durée du CP entre le début de l'accélération et le pic du CP vers l'arrière (To-CParrière). Les interactions Synchronisation X **Tac** ne sont pas significatives. Les résultats de ces analyses sont présentés sur le tableau V-2.

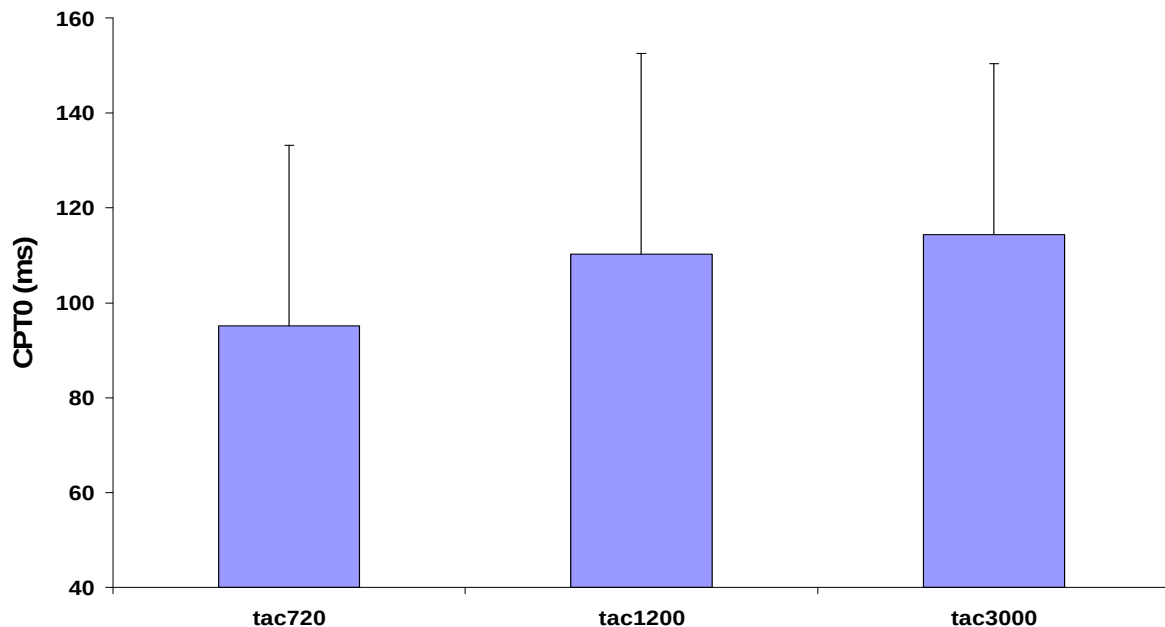


Figure V-9: Moyenne des délais entre le début du déplacement du centre de pression et le début de l'accélération (CPTo) en fonction du temps avant la cible (**Tac**) en mode : anticipation-coïncidence. Les valeurs positives signifient une précession du CP sur l'accélération.

La variable AmpCPmin, qui représente l'amplitude maximale atteinte par le CP vers l'arrière, a fait également l'objet d'une analyse similaire. Les résultats de cette analyse n'ont montré aucun effet significatif des deux facteurs « Synchronisation et **Tac** » [$F_{(1,9)} = 0.4$, $p > .5$; $F_{(2,18)} = 0.9$, $p < .4$, respectivement]. De même, l'interaction « Synchronisation X **Tac** » n'a révélé aucun effet significatif sur l'amplitude du CP. Néanmoins, il semble y avoir une tendance vers une augmentation de l'amplitude du CP avec l'augmentation du **Tac** (moyennes des amplitudes CPmin : -7.7 ± 3.9 , -8.2 ± 5.2 , -8.7 ± 4.6 « unité arbitraire »; respectivement pour des **Tac** 720, 1200 et 3000 ms).

Tableau V.2 : Résultats de l'analyse statistique sur les variables TCParrière et To-CParrière.

Facteurs	Degrés de liberté	TCParrière				To-CParrière			
		Moyenne ± écart type (ms)		F	p	Moyenne ± écart type (ms)		F	p
Synchronisation	(1,9)	Début	226.7± 70.5	0.1	0.71	Début	123.1± 57	0.9	0.34
		Fin	186.5± 75.9			Fin	130.1± 52.1		
Tac	(2,18)	tac720	222.2± 67.6	1.1	0.34	tac720	131.1± 54.3	1.9	0.73
		tac1200	229.4± 65.3			tac1200	126.7± 55.5		
		tac3000	168.2± 80.4			tac3000	122.2± 55.4		
Synchronisation x Tac	(2,18)			1.3	0.28			1.15	0.58

3.3.2. Comparaison des conditions d'anticipation-coïncidence (ACdébut, ACFin) à des différents **Tac** aux conditions réactive et auto-initiée

Une ANOVA à 8 Conditions est appliquée pour chacune des variables du CP afin de vérifier s'il existe des différences entre les conditions, et notamment, si les comportements en AC peuvent se rapprocher des comportements observés dans les situations TRS et AI en fonction du **Tac**.

Les conditions expérimentales influencent significativement le délai séparant le début des déplacements du centre de pression au début de l'accélération du bras (CPTo) [$F_{(7,63)} = 11.2$, $p < .01$]. Le test post-hoc montre un CPTo significativement inférieur en TRS comparé à la condition AI (62.3 ± 17.8 ms; 147 ± 43.9 ms, respectivement). La comparaison entre la condition TRS et les conditions d'AC a révélé que le CPTo est significativement inférieur en TRS sauf lorsqu'on le compare à la condition ACDéb720. Par contre, en condition AI, le

CPT_o est significativement supérieur aux conditions ACDéb 720 et 3000 ms et ACFin 720 et 1200 ms. Ces résultats sont illustrés sur la figure V-10.

L'analyse faite sur la durée totale du déplacement du centre de pression (TCP_{arrière}) a montré un effet significatif de la condition expérimentale [$F_{(7,63)} = 5.01, p < .01$]. Tel qu'illustré sur la figure V-10, cet effet est dû principalement à la différence entre les conditions TRS et AI. Le déplacement total du CP est significativement plus court en TRS par rapport à la condition AI et également à la condition ACFin3000. La comparaison *a posteriori* entre la condition AI et les conditions d'AC a montré des TCP_{arrière} significativement supérieurs en condition AI comparé aux conditions ACDéb 1200, 3000 ms, ACFin720.

Concernant les variables To-CP_{arrière} et AmpCP, on n'observe pas d'effet condition. Les modes de déclenchement (TRS, AI et AC) ne modifient pas significativement la durée du déplacement du CP de To jusqu'au Pic_{arrière} [$F_{(7,63)} = 0.8, p > .5$], ni l'amplitude maximale du CP [$F_{(7,63)} = 0.98, p > .48$].

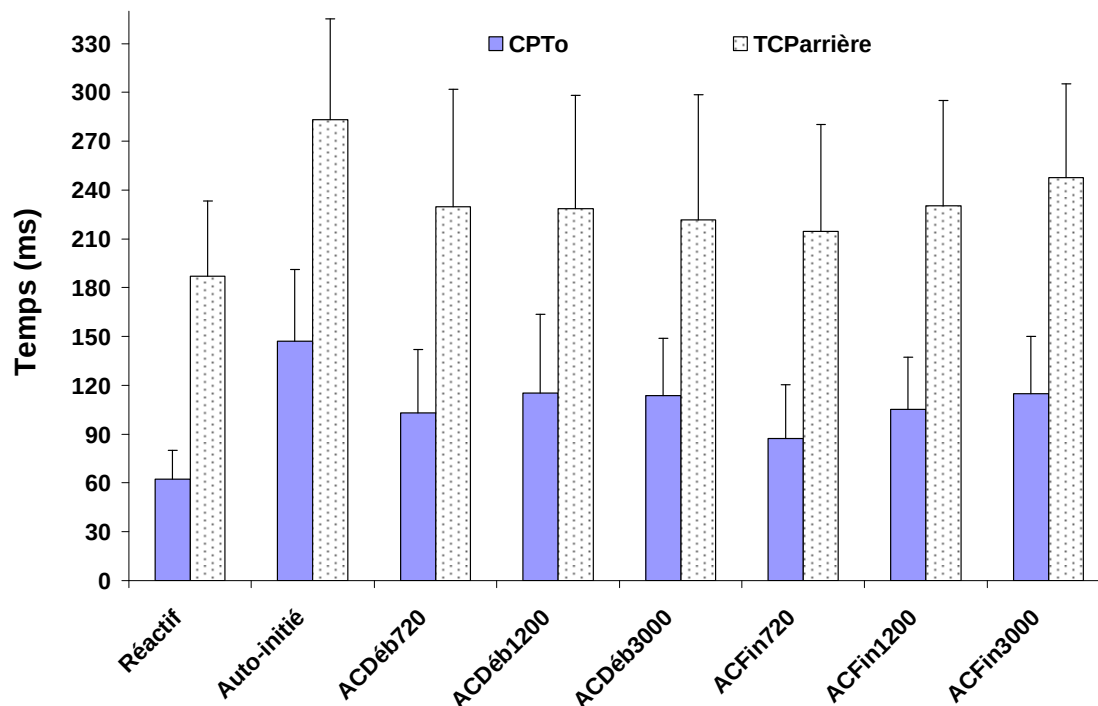


Figure V-10 : Moyenne des délais entre les débuts postural vs focal CPT_o (histogramme plein) et de la durée totale des APAs TCP_{arrière} (histogramme en pointillés) en fonction des conditions expérimentales. On distingue des différences entre les conditions « réactif » et auto-initié. Les différences avec les conditions d'anticipation-coïncidence sont fonction du temps avant la cible.

3.4. Variabilité

Les valeurs des indices de variabilité (IV) ont été soumises aux mêmes méthodes statistiques utilisées précédemment sur les variables temporelles. Les résultats de ces analyses n'ont montré aucune différence significative entre les conditions **Tac** et entre les modes de déclenchement AC, AI et TRS (tableau V-3).

Tableau V.3 : Résultats de l'analyse statistique sur les indices de variabilité.

		Indice de variabilité			
		EMG			
Effet	ddl	2 (Synchronisation) X 3 (tac) X 3 (MP)		2 (Synchronisation) X 3 (tac) X 3 (I EMG)	
		F	P	F	P
Synchronisation	(1, 9)	0.014	0.9	0.5	0.49
tac	(2,189)	0.58	0.56	0.83	0.44
Synchronisation X tac	(2, 18)	1.5	0.24	1.1	0.34
Effet	ddl	8 (Condition) X 3 (MP)		8 (Condition) X 3 (I EMG)	
		F	P	F	P
Condition	(1, 9)	0.7	0.62	0.83	0.56
Condition X MP	(14, 126)	0.75	0.7	0.96	0.48

		Centre de Pression			
		2 (Synchronisation) X 3 (tac)			
Effet	ddl	CPT ₀	debCP-CP _{min}	To-CP _{min}	AmpCP _{min}
		F (p)	F (p)	F (p)	F (p)
Synchronisation	(1, 9)	0.37 (0.55)	0.05 (0.8)	1.5 (0.24)	0.73 (0.41)
tac	(2,189)	1.1 (0.34)	0.42 (0.65)	1.67 (0.21)	0.79 (0.46)
Synchronisation X tac	(2, 18)	0.75 (0.48)	1.9 (0.17)	1.21 (0.31)	0.6 (0.55)
Effet	ddl	8 (Condition)			
		F (p)	F (p)	F (p)	F (p)
Condition	(7, 63)	0.73 (0.63)	0.7 (0.66)	1.4 (0.2)	0.71 (0.66)

Tous les plans effectués sur les moyennes des variables ont été reproduits pour l'IV de chaque variable.

4. Discussion

L'objectif de cette étude était de vérifier si les APAs étaient modulés en fonction du temps disponible pour l'exécution du mouvement, et s'il existait un mode de coordination posture / mouvement spécifique au mode de déclenchement en anticipation-coïncidence. L'analyse des APAs sous les différents temps avant la cible (**Tac**) en anticipation-coïncidence, et sous les différents modes de déclenchement (TRS, AC et AI) montre des changements dans les caractéristiques des APAs. Notre discussion va s'articuler sur trois principaux points : (1) la modulation des APAs en fonction du **Tac** ; (2) la modulation des APAs en fonction des modes de déclenchement ; et enfin (3) les modes de coordination posture / mouvement qui sont impliqués dans chacun des modes de déclenchement.

4.1. Modulation temporelle des APAs en fonction du temps avant la cible en Anticipation-Coïncidence

Contrairement aux résultats obtenus par Aruin *et al.* (2001) dans une tâche de « catching » où la durée de vol avant le contact était variée, nos résultats montrent une certaine gradation des APAs en fonction du temps disponible pour le déclenchement de la réponse. Bien que la contrainte temporelle paraisse similaire entre ces deux études, il semble qu'une tâche motrice, impliquant un déplacement rapide d'un membre et surtout une activité focale, requière une plus grande flexibilité des APAs. Le SNC exploite le temps disponible avant l'exécution du mouvement en modulant la coordination entre posture et mouvement dans le but de palier efficacement la perturbation attendue.

Dans les trois conditions **Tac** on observe la même séquence d'activation des muscles posturaux, comme cela a déjà été observé par Nougier *et al.* (1999). Le GA intervient toujours en dernier dans l'activité des APAs (suivant les muscles enregistrés) et survient presque simultanément avec le début du muscle principalement impliqué dans l'activité focale (DA). Le délai impliquant ce muscle n'est pas influencé par le **Tac**. La gradation des APAs au niveau EMG se manifeste par l'augmentation des délais séparant le début des muscles TFL et ST au DA avec l'augmentation du **Tac**. Ainsi, les APAs apparaissent non seulement plus tôt lorsque le **Tac** est élevé, mais la coordination des muscles posturaux est aussi modifiée; un **Tac** plus court requière une plus grande simultanéité. Cette stratégie est utilisée par le SNC lorsque la contrainte temporelle est forte.

Ces décalages temporels dans l'activité EMG sont accompagnés par des différences dans les déplacements du centre de pression dans l'axe du mouvement. Plus le **Tac** est élevé, plus grande est l'anticipation des APAs telle qu'indexée par le délai séparant le début d'activité du CP et le début de l'accélération du bras. Cette gradation des APAs concorde avec les résultats obtenus par De Wolf *et al.* (1998), Slijper *et al.* (2002) et Cuisinier *et al.* (2005). Ces études ont montré une augmentation du délai qui sépare le début de l'activité posturale et le début de l'activité focale avec l'allongement du temps de réaction. Ces auteurs ont mis en évidence l'allongement du temps pré-moteur pour expliquer le retardement de l'activité focale.

Dans la présente étude, le temps de préparation au mouvement (incluant le temps pré-moteur) a été manipulé dans le but de vérifier s'il influence la coordination posture / mouvement. L'augmentation du temps pré-moteur avec l'augmentation du **Tac** paraît évidente et explique en partie le retardement graduel de l'activité focale. Cependant, les temps de préparation correspondant aux **Tac** 1200 et 3000 ms semblent être trop longs pour en constituer uniquement un temps pré-moteur. A ce titre, les études en EEG ont distingué certaines phases dans la préparation du mouvement et le temps pré-moteur est estimé à 400 ms pour des mouvements auto-initiés.

En effet, lorsque le sujet initie lui-même le mouvement (sans contrainte temporelle), le Bereitschaftspotential (BP) est observé 2s avant le début du mouvement (Kornhuber & Deecke 1965). Ce potentiel augmente son gradient brusquement 400 ms avant le début du mouvement (Kornhuber & Deecke 1965 ; Deecke, Scheid & Kornhuber, 1967 ; Deecke, Grozinger & Kornhuber, 1976 ; Kutas & Donchin, 1980). L'augmentation du BP 400ms avant le mouvement (BP2) est considéré comme spécifique au mouvement, alors que l'activité BP avant les 400ms (BP1) représente la préparation générale au mouvement à venir (Shibasaki & Hallett, 2006). Dans notre étude, les **Tac** apparaissent au moins 720 ms avant le mouvement¹ et les sujets ont suffisamment de temps pour juger la vitesse du mobile (<50ms selon Aruin & Shiratori, 2001 et Beek & Santvoord, 1996), donc le BP2 ainsi que le temps pré-moteur peuvent être équivalents entre les conditions **Tac**. Alors, la gradation des APAs en fonction des **Tac** n'est peut-être pas influencée uniquement par le temps disponible pour l'exécution du

¹ Il faudrait soustraire le temps de mouvement lorsque le sujet doit synchroniser son mouvement sur la fin. Le temps de mouvement dans cette étude est toujours inférieur à 250ms.

mouvement, mais également par les caractéristiques cinématiques du mobile, tel que sa vitesse.

En effet, le **Tac** varie en fonction du changement de vitesse du mobile. L'absence d'effet du mode de Synchronisation (synchronisation sur le début ou sur la fin) constitue un argument important en faveur de l'influence de la vitesse du mobile sur les APAs. La synchronisation sur la fin implique moins de temps de préparation, puisque le temps du mouvement est inclus dans le **Tac**. Si le mode de synchronisation n'influence pas les APAs pour un même **Tac**, cela signifie que les APAs sont influencés par la vitesse du mobile. Cette interprétation peut s'appliquer également aux résultats obtenus par Shiratori et Latash (2001). Dans leur expérience, ils ont constaté une absence dans la modulation des APAs dans une situation d'interception d'une charge qui tombe en chute libre à partir de différentes hauteurs (situation auto-lachée). Les chutes à différentes hauteurs influencent bien la durée du vol (comparable au **Tac** de notre étude) mais les variations de vitesse restent identiques (la charge subit la même accélération g). En rapprochant nos données et celles de Shiratori et Latash (2001), il semble que la vitesse du mobile impliqué dans une tâche d'anticipation-coïncidence joue un rôle important dans l'organisation temporelle des APAs.

4.2. Modulation de la magnitude des APAs en fonction du temps avant la cible en Anticipation-Coïncidence

Nos résultats ont montré un effet **Tac** et une gradation de la magnitude des muscles posturaux en fonction du **Tac**. En revanche, cet effet **Tac** ne se répercute pas sur l'amplitude du déplacement du CP vers l'arrière. Il est possible que les différences de $\int$ EMG enregistrées entre les conditions **Tac** est provoquée par une différence entre les trois muscles posturaux étudiés et non pas par le **Tac**. D'ailleurs, lorsque les muscles sont comparés individuellement (interaction **Tac X $\int$ EMG**) on n'observe pas d'effet **Tac**. En prenant en considération tous ces résultats ($\int$ EMG, CP, interaction), on peut supposer que le **Tac** n'influence pas la magnitude des APAs et que le peu d'effet enregistré n'est peut être que le résultat de l'augmentation du délai entre le début des APAs et l'activité focale en fonction du **Tac**. Ce résultat montre que le SNC prédit la même perturbation pour la même action motrice, même si le mouvement est déclenché sous différentes pressions temporelles. Dans ce cas, il génère une quantité d'ajustement constante en magnitude, mais module la fréquence de décharge des motoneurones en fonction du temps disponible. Cependant, des études antérieures ont montré

que l'amplitude des APAs est modulée par d'autres facteurs manipulant la magnitude de la perturbation tels que l'action motrice et l'amplitude du mouvement (Horak *et al.*, 1984 ; Bouisset & Zattara 1987 ; Lee *et al.*, 1990 ; Aruin & Latash, 1995a,b ; Aruin & Latash, 1996 ; Bouisset, Richardson, Zattara, 2000a ; Li & Aruin, 2007).

Le mode de synchronisation ne semble pas affecter l'amplitude du CP. Cependant, des différences ont été enregistrées sur les muscles posturaux. Comme discuté dans le précédent paragraphe, cette différence statistique est peut être liée aux différences entre les trois muscles posturaux (GA, ST, TFL) et non pas aux différences entre les conditions. D'ailleurs, cette différence disparaît lorsque le muscle est comparé à lui-même entre les modes de synchronisation.

L'absence de différence entre les modes de synchronisation semble être en contradiction avec notre hypothèse issue des résultats de l'étude 1. Puisque les sujets devaient synchroniser la fin du mouvement au signal AC dans l'étude 1, nous avons suggéré que la similarité entre les conditions AC et AI était due à l'absence de contrainte temporelle sur le début du mouvement en AC. Par conséquent, nous avons supposé l'existence d'une éventuelle différence dans la génération des APAs selon le mode de synchronisation (début-fin). Notre hypothèse est basée sur une possibilité d'une programmation partielle des paramètres du mouvement, en synchronisation sur la fin, dans le but de réajuster, si nécessaire, un décalage par rapport aux déplacements du mobile. Le soulèvement de bras est un mouvement discret et rapide (balistique) qui est difficile à corriger au cours de son déroulement. Ce type de mouvement requière une programmation totale de tous les paramètres avant son exécution, par conséquent, la coordination posture / mouvement n'est pas affectée par le type de synchronisation. De plus, contrairement à la grande variabilité enregistrée dans la condition AC de l'étude 1, cette étude a montré une similitude dans la variabilité entre les conditions AC et entre les conditions AC et les conditions AI et TRS. Ce résultat soutient également l'idée d'une programmation totale des paramètres du mouvement lorsque celui-ci est de type balistique.

4.3. Modulation temporelle des APAs et modes de déclenchement

TRS vs AI :

La comparaison des conditions AI et TRS donne des résultats similaires à ceux observés dans des expériences manipulant ces deux modes de déclenchements, en l'occurrence, des différences dans les patterns des APAs et dans la coordination posture / mouvement (De Wolf *et al.*, 1998 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper *et al.*, 2002). Cependant, ces études ont mis en évidence la similarité des comportements entre ces deux conditions lorsque le temps pré-moteur est allongé à la suite de l'augmentation du temps de réaction (De Wolf *et al.*, 1998 (TRS); Slijper *et al.*, 2002 (TRC) ; Cuisinier *et al.*, 2005 (TRS avec variation de la période préparatoire)). En se basant sur les résultats de ces études, nous avons manipulé le temps précédant l'exécution du mouvement (**Tac**) à l'aide d'une tâche d'anticipation-coïncidence et nous avons supposé un comportement en condition TRS proche de la condition AC lorsque les **Tac** étaient courts (720, 1200ms), et un comportement en condition AI proche de la condition AC lorsque les **Tac** étaient longs (1200, 3000ms). Une alternative impliquant un mode spécifique à une tâche d'anticipation-coïncidence était suggérée si les comportements entre AC et les deux conditions AI et TRS sont différents.

TRS vs AC :

Globalement, les délais entre le début de l'activité posturale et focale (EMG, CP) en condition TRS sont significativement différents de ceux enregistrés dans les conditions AC. Seule la condition ACdébut720 montre une différence non significative sur la variable CPTo. Ces résultats montrent qu'il existe une stratégie d'organisation temporelle spécifique à la condition réactive, et cela se traduit principalement par le retardement de l'apparition des APAs. La réduction du temps pré-moteur (surtout en ACFin720) ne provoque pas un comportement similaire à une tâche de TRS, d'autres paramètres liés à l'incertitude du moment d'apparition du signal de déclenchement et à la vitesse de réponse provoque un mécanisme différent que lorsque le signal de réponse est prévisible.

AI vs AC :

Les différences de coordination posture / mouvement entre les conditions TRS et AC, et entre TRS et AI présume une similarité des comportements entre les deux conditions non réactive AC et AI. La comparaison entre ces deux conditions a montré des résultats intéressants. D'une part, on enregistre une différence de coordination entre AI et AC lorsque le **Tac** est égal à 720ms, d'autre part une possibilité d'évolution de la condition AC vers un mode de coordination similaire à la condition AI lorsque le **Tac** augmente et/ou que la vitesse du mobile est réduite. L'existence de cette évolution signifie que les conditions AC et AI partagent le même mécanisme de coordination entre posture et mouvement lorsque le moment de déclenchement est prédictible. Cependant, cette prédiction s'affaiblit lorsque l'estimation du temps avant le déclenchement devient difficile à cause de l'augmentation de la vitesse du mobile. Dans ce cas, les APAs sont moins anticipés.

4.4. Modulation de la magnitude des APAs et modes de déclenchement

La comparaison des amplitudes entre AC et AI et entre AC et TRS a donné pratiquement les mêmes résultats. Par conséquent on donnera une interprétation commune. Les résultats obtenus sur les amplitudes sont différents des données temporelles. Il n'y a pas d'effet condition sur l'amplitude des APAs (CP, EMG). Cela appuie l'interprétation donnée précédemment (pages 107-108). C'est-à-dire, quelque soit le mode de déclenchement, les paramètres du mouvement restent les mêmes (direction, amplitude, inertie, vitesse), par conséquent le SNC prédit toujours la même magnitude de perturbation. Cette prédiction nécessite une magnitude d'APAs constante, mais qui est seulement modulée dans le temps. Cependant, l'interaction Condition X $\int$ EMG montre des amplitudes significativement inférieures du ST et du TFL en condition TRS. Il est possible que la fréquence de décharge soit répartie différemment entre les autres muscles posturaux (notamment la chaîne dorsale) ce qui empêche une répercussion sur le déplacement arrière du CP. Cette éventualité signifie que la spécification des muscles posturaux est influencée par le mode de déclenchement.

4.5. Modes de coordination entre posture et mouvement

Les études ayant examiné les modes de coordination entre posture et mouvement ont suggéré deux modes d'organisation (Massion, 1992 ; Massion *et al.*, 2004). Le premier (hiérarchique) considère que les APAs et l'activité focale sont les conséquences périphériques

d'une seule commande générée par le SNC. Le deuxième (parallèle) suppose l'existence de deux commandes opérant parallèlement, l'une génère l'activité focale et l'autre génère l'activité posturale.

Dans l'étude 1, nous avons fait une analogie entre le modèle prédictif / réactif de Paillard (1990) et entre ces deux modes de coordination entre posture et mouvement. Paillard *et al.* (1989) avaient interprété la différence dans la simultanéité de deux effecteurs (doigt, talon) en condition réactive et auto-initiée comme étant due à une différence dans la génération des commandes impliquant ces deux effecteurs. Dans la condition réactive il suggère l'existence d'une seule commande impliquant le doigt et le talon, alors qu'en condition auto-initiée les commandes impliquant le doigt et le talon sont dissociées. Alors nous avons supposé qu'une condition réactive impliquerait une coordination posture / mouvement selon le modèle hiérarchique, tandis-que le modèle parallèle interviendrait en condition auto-initiée.

Nos données montrent que la coordination entre les APAs et l'activité focale en condition réactive est distinctive à ce mode. Les APAs apparaissent dans le même temps et presque simultanément avec l'activité focale. L'augmentation de la pression temporelle en condition AC (tac720) ne montre pas de similitude avec la condition TRS. La voie de réponse la plus simple pour le SNC, lorsque le signal de déclenchement impliquant une réponse rapide est imprévisible dans le temps, est d'effectuer un seul traitement hiérarchisé impliquant les activités focale et posturale. En revanche, lorsque le moment de réponse est prévisible, le SNC peut effectuer un traitement parallèle en dissociant les commandes focales et posturales, en conséquence, la commande focale est retardée. Cependant, le timing entre ces deux commandes peut varier dans une tâche d'anticipation-coïncidence. Il dépend du temps disponible pour exécuter le mouvement et des caractéristiques cinématiques (dans notre étude) et/ou dynamiques (Shiratori & Latash, 2001) du mobile.

Conclusion

Cette étude a montré :

(1) une gradation des APAs dans une tâche d'anticipation-coïncidence en fonction du temps disponible avant l'exécution du mouvement, mais également en fonction des caractéristiques cinématiques (vitesse) du signal impliquant la coïncidence. Ce mode de déclenchement (AC) semble partager les mêmes mécanismes centraux de coordination posture / mouvement qu'avec un mode de déclenchement AI. Ceci est lié principalement à la prédictibilité du moment de déclenchement qui lie ces deux modes.

(2) une augmentation de la pression temporelle en AC ne rapproche pas les comportements à ceux observés en condition TRS. Un mode de coordination spécifique à la condition réactive est proposé.

(3) une manipulation de la pression temporelle modifie principalement les caractéristiques temporelles des APAs.

Chapitre VI. L'inhibition Focale et Posturale de mouvements préparés en modes réactif et en anticipation-coïncidence.

1. Introduction

Les mouvements volontaires sont généralement précédés par des ajustements posturaux anticipateurs (APAs) dans le but de minimiser les perturbations attendues induites par le mouvement (Massion, 1992). Dans les études impliquant les APAs, les sujets sont appelés à soulever le bras à partir d'une position érigée (Belenkii *et al.*, 1967 ; Cordo & Nashner, 1982 ; Bouisset & Zattara, 1983, 1987 ; Clément *et al.*, 1984 ; Cuisinier *et al.*, 2005). Les résultats de ces études ont montré que les muscles posturaux sont activés avant les muscles qui sont impliqués directement dans l'exécution du mouvement volontaire (muscles focaux), et qu'un déplacement du centre de pression (CP) est observé avant l'initiation de l'action motrice volontaire.

Cependant, la coordination entre posture et mouvement est modifiée par les exigences mécaniques de la tâche (Frideli *et al.*, 1984 ; Horak *et al.*, 1984 ; Lee *et al.*, 1987), les contraintes posturales (Cordo, Nashner, 1982 ; Frideli *et al.*, 1984 ; Benvuneti *et al.*, 1997 ; Slijper *et al.*, 2002 ; Robert *et al.*, 2007 ; Li & Aruin, 2007) et les conditions comportementales tel que les contraintes temporelles (Horak *et al.*, 1984 ; Brown, Frank, 1987 ; Lee *et al.*, 1987 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper *et al.*, 2002 ; Ilmane & Larue, 2008). Cette flexibilité dans la coordination entre posture et mouvement peut être attribuée à des différences dans l'organisation centrale des composantes posturale et focale impliquant le mouvement volontaire. Les études antérieures ont suggéré deux modes de coordination entre posture et mouvement.

Dans le premier mode, les APAs et l'activité focale ne sont pas dissociés lors de la préparation du mouvement. Un seul programme moteur est établi pour accomplir les exigences posturales et le mouvement focal (mode de contrôle hiérarchique, Massion, 1992). Dans ce mode de coordination, le mouvement volontaire et les ajustements posturaux s'effectuent dans le même temps (Massion 1992, Massion *et al.*, 2004 ; Slijper *et al.*, 2002). Les données appuyant ce mode de contrôle ont été observées sur des mouvements induits par des stimulations électriques du cortex moteur chez le chat (Gahéry & Nieoullon, 1978 ; Gahéry & Massion, 1981). La force verticale exercée par chaque membre postural change dans le but de résister au poids du corps, ces forces dépendent du membre qui est stimulé.

Comme conclusion, une stimulation électrique unique produit une activité posturale et focale. Chez l'homme, Aruin et Latash (1995a) ont étudié le rôle de l'action motrice sur les APAs. Ils ont montré que la modulation des APAs dépend de la magnitude de l'action motrice qui provoque la perturbation. Cette dernière est induite par un délestage suite à un mouvement du doigt ou de l'épaule. Ils suggèrent l'existence d'une relation assez proche entre la magnitude des APAs et la magnitude de l'action motrice qui provoque la perturbation posturale (Bouisset *et al.*, 2000a,b ; Shiratori & Aruin, 2007). Toussaint *et al.* (1997) ont examiné la régulation de l'équilibre et le contrôle du mouvement dans une tâche de soulèvement bi-manuel. Ils ont comparé les cycles de soulèvement avec charge (20% de la masse du corps) et les cycles sans charge. Des APAs ont été observés juste avant le soulèvement de la charge. L'apparition des APAs dans cette condition semble être les conséquences du déplacement vers l'avant du centre des masses suite au rajout de la charge. Les auteurs ont conclu que les commandes déclenchant les ajustements posturaux sont étroitement liées avec les commandes contrôlant le mouvement en cours.

Dans le deuxième mode, on suppose que les APAs et le mouvement focal sont organisés par deux processus indépendants, et sont générés par des programmes moteurs parallèles distincts (model parallèle, Massion 1992). Des données récentes aussi bien chez l'animal que chez l'homme appuient cette thèse. Ainsi, Schepens et Drew (2004) ont montré deux types de déchargement de neurones chez le chat. Le premier se produit assez tôt et est relié au signal « Go » de départ, le second survient plus tard et il est relié au début du mouvement. Par conséquent, le premier signal contribue au déclenchement des APAs qui précède le mouvement, tandis-que le second contribue au déclenchement du mouvement et à la production des réponses posturales qui accompagnent le mouvement. De telles études n'ont pas été effectuées sur l'homme, mais plusieurs données comportementales indiquent que les contrôles postural et focal sont organisés indépendamment.

Le premier indice concerne le début de l'activité posturale et le début de l'activité focale qui sont dissociés lors de l'exécution de mouvements auto-initiés (Horak *et al.* 1984 ; Lee *et al.* 1987 ; Benvenuti *et al.* 1990 ; Nougier *et al.* 1999 ; Slijper *et al.* 2002), ou en situation de temps de réaction de choix (Brown & Frank, 1987 ; Slijper *et al.*, 2002). Le deuxième indice concerne l'apparition des APAs lorsque la perturbation posturale prédite survient en l'absence d'une action motrice volontaire (le catching) (Lacquaniti & Maioli, 1989a,b ; Lavander & Marras 1995 ; Aruin, *et al.*, 2001). Un dernier élément concerne la

modulation des APAs en fonction de la contrainte posturale. En effet, Robert *et al.* (2007) ont montré que le changement de la distribution de la masse du corps (en ajoutant une charge au segment non focal) a un effet uniquement sur les APAs. Aucun effet n'a été observé sur la trajectoire ni sur la cinématique du mouvement focal. Les auteurs sont arrivés à la conclusion que si les APAs et le mouvement focal sont générés par une seule commande, cela aurait changé les APAs et le mouvement focal selon le nouveau schéma postural. Par conséquent, les auteurs ont plaidé en faveur d'un contrôle parallèle des APAs et du mouvement focal. Des résultats similaires ont été obtenus également par Aruin *et al.* (2007).

Les résultats et conclusions de ces expériences sont plutôt contradictoires. Il est cependant possible que les deux modes de coordination existent, mais qu'ils soient mis en action selon la situation (comme celles observées dans les différentes conditions expérimentales). L'objectif de cette étude est d'examiner quel mode de coordination intervient lorsque le mouvement est exécuté sous les conditions de pression temporelle réactive et prédictive.

Dans les études impliquant la modulation des APAs sous contraintes temporelles réactive et prédictive (auto-initiée : AI) (Benvenuti *et al.* 1990, 1997 ; De Wolf *et al.*, 1998 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper *et al.*, 2002) l'intervalle entre le début des APAs et le début du mouvement varie en fonction du mode de contrôle. Le début du mouvement focal s'effectue dans le même temps avec l'activité posturale dans le premier mode (réactif), et les APAs apparaissent presque simultanément avec le début du mouvement focal. Alors qu'en situation AI, les APAs semblent être dissociés du mouvement focal, puisqu'ils surviennent assez tôt par rapport au début du mouvement focal. A partir de ces résultats, nous supposons que le modèle hiérarchique opère en condition réactive, puisque les activités posturale et focale surviennent presque simultanément et dans le même temps. En revanche, l'excédent du temps disponible pour la préparation du mouvement en condition AI permet une dissociation des commandes. Cette opération permet de lancer la commande posturale en premier pour préparer des conditions optimales d'équilibre pendant l'exécution du mouvement focal.

La combinaison du paradigme stop aux modes de déclenchement réactif et prédictif, sur un mouvement impliquant les APAs, permettrait de vérifier l'association ou la dissociation des commandes posturale et focale à travers l'inhibition de l'une ou des deux commandes. Si l'application de ce paradigme stop au mode réactif impliquant une tâche de

temps de réaction simple (TRS) semble possible (Lallouche-Boiron & Audiffren, 2008), il paraît impossible de l'appliquer sur un mouvement auto-initié. L'utilisation d'une tâche d'anticipation-coïncidence constitue une belle alternative, car il est alors possible de placer les signaux stop en fonction du moment de synchronisation. Nous avons montré dans les études 1 et 2 que les comportements observés dans la condition d'AC sont équivalents à ceux observés en situation AI, lorsque le temps avant la cible est ≥ 3000 ms. Larue (2007) a montré également la similarité des comportements en AC et en AI. Dans son expérience impliquant une tâche d'AC, l'auteur avait trouvé les mêmes comportements observés par Bard *et al.* (1992) lorsque les sujets tentaient d'effectuer une extension simultanée du doigt et du talon ipsilateral en condition AI. Dans la même étude, Larue (2007) a également combiné la tâche d'AC avec le paradigme stop.

Le « race model » (Logan, 1984, 1994 ; Band & van Boxtel, 1999) du paradigme stop considère le contrôle de l'inhibition comme une course entre le processus d'exécution et le processus d'inhibition de la réponse. Si les opérations du processus d'inhibition s'achèvent avant ceux de l'exécution du mouvement, la réponse est correctement inhibée, autrement, la réponse est exécutée. Donc, si les activités posturale et focale sont déclenchées par une seule commande motrice, on devrait alors observer une inhibition ou une activation simultanée des paramètres postural et focal. Car dans ce cas, le processus d'inhibition entre en course contre une seule commande motrice incluant l'activité posturale et focale. En revanche, les inhibitions focale et posturale devraient être dissociées si les activités posturale et focale sont contrôlées par deux commandes distinctes. Par conséquent, on s'attend, sur quelques essais stop, à ce que la deuxième commande (focale) puisse être inhibée alors que la commande posturale est déclenchée. Dans ce cas, le processus d'inhibition gagne sa course contre la deuxième commande (focale) en supposant que la commande des APAs survienne toujours en premier.

2. Méthode

2.1. Sujets

Dix sujets droitiers masculins ont participé à l'expérience. La moyenne d'âge est de 29.7 ans (ET = 3.6). Les sujets n'ont aucun antécédent neuromusculaire et possèdent une acuité visuelle et auditive normale. Ils ont signé un formulaire de consentement approuvé par le service « Sécurité & Santé » de l'université d'Orléans.

2.2. Tâche

La tâche est similaire à celle utilisée dans l'étude 2, à savoir une flexion unilatérale de l'épaule en soulevant le bras avec une charge additionnelle jusqu'à l'horizontale. Deux modes de déclenchement ont été testés :

- (1) déclencher le mouvement le plus rapidement possible en réponse à un signal externe lumineux ;
- (2) déclencher le mouvement en synchronisant le début du mouvement avec le passage d'un mobile visuel sur une cible (tâche d'anticipation-coïncidence);

Occasionnellement et de façon imprévisible, un bip sonore pouvait intervenir indiquant au sujet d'inhiber sa réponse en préparation. Ce point sera présenté en détail dans la partie « procédure ».

2.3. Matériel

Les mesures effectuées dans cette étude sont similaires à celles de l'étude 2, sauf en ce qui concerne l'enregistrement de la fin du mouvement (cellule photoélectrique) qui est supprimé. La plate forme de force et l'accéléromètre sont les mêmes que ceux utilisés dans les études 1 et 2. La charge à soulever est également la même.

Les électrodes de surface utilisées dans cette étude sont différentes de celle de l'étude 2. Ces électrodes bipolaires (Biopac TSD 150a[®], Goleta, CA) de type Ag-AgCl (3.5 cm) permettent d'amplifier les signaux à la source (gain = 350 ; bande passante de 12 à 500Hz). Elles ont été placées sur la portion centrale des muscles suivants : *Déltôïde Antérieur* (DA), le *gastrocnémien* (GA) et le *semi-tendineux* (ST) ipsi-latéral, et le *tenseur du Fascia Latae* (TFL) contra-latéral. Les signaux stop sont donnés par un buzzer piézoélectrique (impulsion de 80ms) contrôlé par l'ordinateur.

Tous les signaux ont été enregistrés simultanément grâce à un programme élaboré sous Matlab[™] (R11) avec une carte d'acquisition A/D (model CIO-DAS1602, résolution 16 bits) à une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz.

2.4. Procédure

Les sujets ont été testés individuellement en trois sessions expérimentales. L'espace entre les sessions n'était pas prédéfini à l'avance, mais dépendait plutôt de la

disponibilité des sujets. Néanmoins, un minimum de 12 heures entre les sessions était requis. Chaque session comprend 256 essais répartis en quatre blocs de 64 (Deux blocs pour chacune des conditions expérimentales). Chaque session dure environ 3 heures en incluant les périodes de repos. Pour éviter la fatigue, ces périodes de repos sont programmées entre les essais (20 secondes) et entre les séries (5 à 10 minutes), mais elles sont également autorisées si nécessaire (à la demande du sujet).

Une fois que les sujets ont mis la main au contact de la plaque métallique puis stabilisé leur posture sur la plate forme de force, ils sont appelés à soulever le bras à l'horizontale (figure VI-1) le plus rapidement possible dans deux conditions de pression temporelles : (1) en condition réactive, les sujets devraient répondre le plus rapidement possible à l'allumage de la diode (durée d'occurrence : 80ms). C'est une situation de temps de réaction simple (**TRS**). Le signal apparaît aléatoirement sur une période de 8sec ; (2) en condition d'Anticipation-Coïncidence (**AC**), les sujets devraient synchroniser le début du mouvement avec le passage du mobile visuel sur la cible. La scène animée est la même que celle utilisée dans l'étude 1, le mobile prend 5100ms avant de coïncider avec la cible. L'ordre de présentation des conditions était contrebalancé entre les sujets. Avant chaque session, quelques essais d'entraînement étaient exécutés pour familiariser les sujets aux appareils, les conditions expérimentales, et surtout aux signaux stop.

Les signaux stop sont programmés à l'avance selon la méthode des stimuli constants de Gustav Fechner. Leurs apparitions sont aléatoires et donc imprévisibles pour les sujets et l'expérimentateur. Nous avons toutefois vérifié, avant de créer chaque fichier de stimuli, qu'il n'y ait pas de périodes trop longues sans signal (pas plus de 8 essais), afin que les sujets restent vigilants compte tenu de la durée totale du test. Chaque bloc de 64 essais est composé de 48 essais **Go** (75%) et de 16 essais stop (25%). Ces proportions réduisent les possibilités de prédiction du moment d'apparition des stimuli d'arrêt. Huit signaux stop à intervalle de 40 ms ont été utilisés : de -20 à 260 ms dans la condition TRS et de -300 à -20 ms en condition AC. On réfère le temps zéro (T_0) au signal **Go**. Les huit signaux stop ont la même probabilité d'apparition au cours d'un bloc, à savoir deux fois. Le tableau VI-1 récapitule la distribution des signaux au cours de l'expérience.

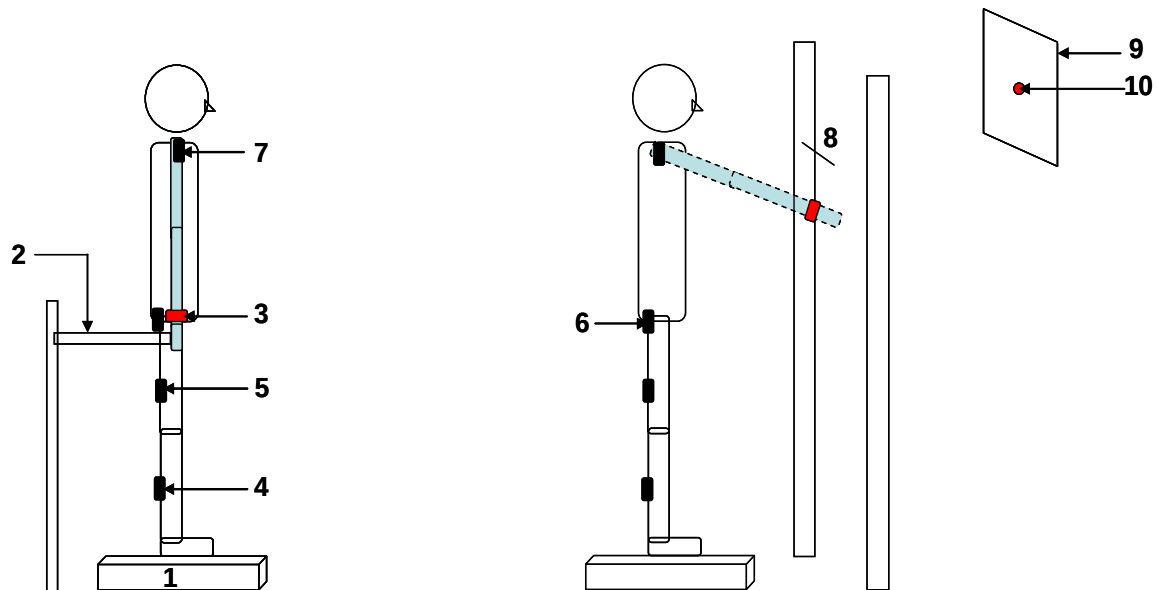


Figure VI-1 : Illustration du dispositif expérimental

Vue latérale d'un sujet droitier en position initiale (gauche) et pendant l'exécution du mouvement (droite) de flexion unilatérale de l'épaule. En position initiale, les sujets se tiennent debout sur la plateforme de force (1), la main au contact de la plaque métallique (2). La charge additionnelle ainsi que l'accéléromètre sont placés au niveau du poignet (3). Les signaux EMG sont enregistrés sur les muscles suivants : Gastrocnémien (4), Semi-Tendineux (5), Tenseur Fascia Latae (6) et Deltoïde Antérieur (7). Pour donner aux sujets un repère de l'amplitude du mouvement, une lamelle flexible (8) a été installée à hauteur de l'épaule. Une planche (9 : 50X50 cm²) est placée à 180 cm du sujet, elle sert de support pour la diode (10) qui envoie le signal de départ en condition réactive. Cette diode est située à hauteur des yeux. La planche est remplacée par un écran d'ordinateur dans la condition d'anticipation-coïncidence.

Tableau VI.1 : Distribution des signaux au cours de l'expérience.

	Conditions	
	Réactive	Prédictive
Nombre de sessions	6	6
Essais par session	64	64
Essais Go par session	48	48
Essais Stop par session	16	16
Valeur minimale des SS (ms)	-20	-300
Valeur maximale des SS (ms)	260	-20
Valeur du pas (ms)	40	40
Nombre de SS	8	8

SS=signaux stop, ms = millisecondes

2.5. Traitement des données

Une rupture main-plaque métallique provoque un changement du signal TTL signifiant que le sujet avait échoué à l'inhibition du mouvement. Les signaux de l'EMG, de l'accéléromètre et des déplacements du centre de pression (CP) ont été soumis à un algorithme développé sous Matlab[®] (R11) pour détecter : (1) si les tracés atteignent les critères d'activation, et particulièrement lorsque le mouvement du bras est inhibé (pas de rupture de contact). Les critères d'activation sont atteints lorsque le signal enregistré dans la fenêtre To-500 à To+700 ms (To=signal **Go**) est supérieur au seuil défini par la moyenne + trois écart-types de l'activité basale. Si ce critère n'est pas atteint, on considère que l'activité du paramètre étudié est inhibée. (2) le début de chaque tracé était également détecté si les paramètres sont activés. Il correspond au premier zéro de la deuxième dérivée, trouvé itérativement à partir de l'occurrence du premier point étant supérieur au seuil défini par la moyenne + trois écart-types de l'activité basale.

Les principales variables dépendantes sont les fréquences d'inhibition de chaque paramètre ainsi que le délai entre le début de l'activité postural (EMG du GA, TFL, ST ; déplacements du CP) et le début de l'activité focale (EMG du DA ; accélération ; rupture de contact).

2.6. Analyse statistique

Les variables ont fait l'objet d'analyses de variance ANOVA & MANOVA à mesures répétées sur le logiciel Statistica[™] V 5.1 dans le module GLM ; des tests *a posteriori* de Tukey ont été effectués lorsque les effets étaient significatifs. Des tests **G** ont été également utilisés pour comparer certaines proportions. Le seuil de signification statistique a été fixé à 0.05. Pour se préserver des violations des conditions de sphéricité de l'analyse de variance à mesures répétées, les niveaux de probabilité ont été ajustés selon la procédure de Greenhouse-Geisser.

3. Résultats

Un essai est inhibé lorsqu'il n'y a pas de rupture du contact de la main sur la plaque métallique. Les fréquences d'inhibitions enregistrées sur l'accéléromètre et le contact main-plaque sont identiques quelque soit la condition. Dans ce cas, on parlera de mouvement de bras inhibé (incluant accéléromètre et contact main-plaque).

3.1. Essais non inhibés (mouvement déclenché)

Les comportements observés sur les essais non inhibés sont similaires à ceux observés dans l'étude 2, à savoir une précession du début de l'activité postural (muscles posturaux, centre de pression) sur le début de l'activité focal (EMG-DA, accélérations) (figure VI-2). Cela montre l'implication des APAs dans l'exécution du mouvement.

Les délais entre le début de l'activité des muscles posturaux (GA, TFL, ST) et le début de l'activité du muscle focal (DA) ont été calculés et soumis à une ANOVA 2(Condition) X 3(Muscle) à mesures répétées. Les effets principaux sont significatifs [$F_{(1,9)} = 394$, $p < 0.01$; $F_{(1,9)} = 200$, $p < 0.01$ pour les facteurs Condition et Muscle respectivement] de même que l'interaction [$F_{(2,18)} = 218$, $p < 0.01$]. Selon le test post-hoc de Tukey, cette interaction est due au fait que les délais du GA ne changent pas significativement entre les conditions alors que les délais du TFL et du ST sont significativement plus courts en condition réactive. Ces différences entre les conditions ont été également observées sur les délais séparant le début du déplacement du centre de pression au début de l'accélération [$F_{(1,9)} = 80$, $p < .01$]. Les délais (valeurs absolues) en condition AC sont significativement supérieurs aux délais enregistrés en condition TRS (figure VI-2). Ces résultats permettent de s'assurer que, sur les essais inhibés, le mécanisme d'inhibition intervient sur deux modes différents de gestion de la motricité.

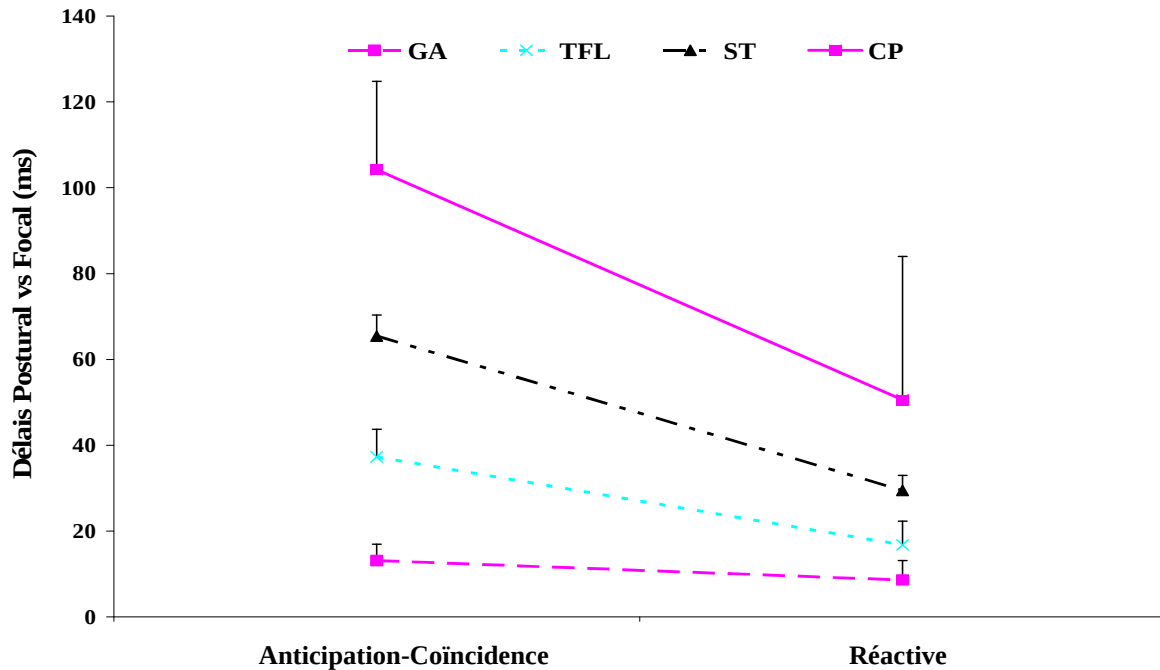


Figure VI-2: Illustration de l'interaction Condition X Délai. Les délais sont calculés entre le début de l'activité des muscles posturaux (GA : Gastrocnémien ; TFL : Tenseur du Fascia Latae ; ST : Semi Tendineux) et le début de l'activité du muscle focal (Deltoïde Antérieur) ainsi qu'entre le début du déplacement du centre de pression (CP) à celui de l'accélération. Les valeurs positives indiquent que l'activité posturale précède l'activité focale.

3.2. Essais inhibés (mouvement de bras inhibé)

Dans un premier temps, on effectuera une comparaison des taux d'inhibition entre l'activité posturale et l'activité focale dans chacune des conditions. Ensuite on essayera de dater l'envoi des commandes motrices pour chacun des paramètres (postural et focal). Enfin, on comparera les comportements entre les conditions TRS et AC à travers les pourcentages d'inhibition et les délais séparant les dates d'envoi des commandes posturale et focale enregistrées dans chacune des conditions.

3.2.1. Condition Réactive

3.2.1.1. Analyse électromyographique

La figure VI-3 montre la fréquence d'inhibition du mouvement du Bras et celle de tous les muscles (X4) en fonction des Signaux Stops (SS). Les SS s'échelonnent de -20 à 260 ms. Tel que prévu, la principale tendance est une diminution du taux de réussite à l'inhibition du mouvement et de l'activité de tous les muscles avec l'augmentation du temps des SS. En

effet, plus les sujets sont prévenus tôt, plus leur chance d'arrêter la commande du mouvement est grande. Cependant, on s'attendait à un taux d'inhibition plus élevé sur les SS -20 et 20ms, car le SS est très proche du signal Go. Il est possible que les sujets confondent parfois les stimuli Go et Stop, malgré leur nature différente (visuel vs auditif). Ce type d'erreur est observé dans les expériences impliquant une tâche « Go-No-Go » ou dans les expériences de temps de réaction de choix (Pachelia, 1974 ; Wickelgren, 1977 ; Proteau & Dionne, 1982). Cette confusion est peut être à l'origine du taux faible d'inhibition au SS 20 ms par rapport à celui enregistré à 60 ms.

Le taux d'inhibition du mouvement de bras est supérieur de 23.2% au taux d'inhibition du Deltoïde Antérieur (considéré comme le principal muscle focal), et de 32.2, 28.7 et 39%, au taux d'inhibition des muscles posturaux (GA, TFL et ST respectivement). On constate qu'une inhibition du mouvement de bras n'est pas forcément accompagnée par une inhibition du deltoïde antérieur. Dans ce cas, on considère que la commande motrice est déclenchée mais n'a pas atteint le seuil qui permet le déclenchement du mouvement (De Jong *et al.*, 1990). Alors, pour vérifier si les activités posturale et focale sont générées par une commande commune ou deux commandes séparées, on comparera uniquement l'inhibition du DA avec l'inhibition du GA, TFL et du ST.

Une ANOVA à mesures répétées sur les fréquences d'inhibition des quatre muscles a été effectuée. Les résultats montrent une différence significative dans les taux d'inhibition des muscles [$F_{(3,27)} = 14.3$, $p < 0.01$]. Le test post-hoc de Tukey a montré que le taux d'inhibition du deltoïde antérieur (33 ± 6.8) est significativement supérieur au taux d'inhibition du GA et du ST (29 ± 4.3 ; 26 ± 3.5 respectivement). On enregistre également un taux d'inhibition du TFL (30 ± 5.9) significativement supérieur à celui du ST.

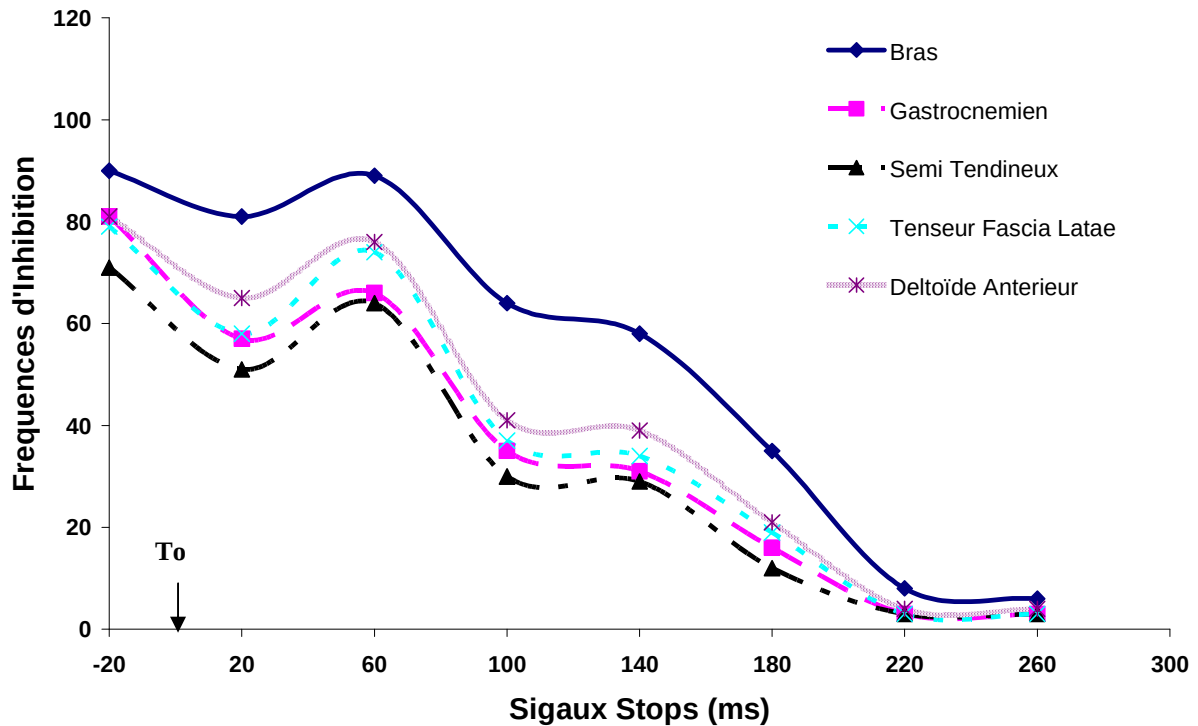


Figure VI-3: Fréquences d'inhibition enregistrées sur les muscles (focal et postural) et sur le mouvement du bras en fonction des signaux stop en condition réactive chez tous les sujets. L'instant *To* correspond au moment d'apparition du stimulus de réponse.

3.2.1.2. Analyse du centre de pression

La figure VI-4 montre la fréquence d'inhibition du mouvement de Bras, du Deltoïde Antérieur (DA) et du centre de pression (CP) en fonction des Signaux Stop (SS). La courbe d'inhibition du CP est quasiment superposée sur celle du DA. Une ANOVA 3 (Sites d'inhibition) a été effectuée pour comparer l'inhibition du CP, du DA et du Bras. Les résultats ont montré une différence significative dans l'inhibition des trois sites [$F_{(2,18)} = 7.5, p < .004$]. Le test post-hoc a montré des taux d'inhibition du CP et du DA significativement inférieurs à celui du Bras (33.1 ± 4.2 ; 33.6 ± 3.8 ; 41 ± 5 ; respectivement pour le CP, DA et Bras). Cependant, il n'y a pas de différence entre les taux d'inhibition du CP et du DA (33.1 ± 4.2 ; 33.6 ± 3.8 ; respectivement pour le CP et le DA).

La courbe du CP est superposée sur celle du DA ce qui indique que le taux d'inhibition du CP est supérieur à celui des muscles posturaux. En effet, comme cela a été déjà observée sur le DA et le mouvement du bras, une activation des muscles posturaux n'engendre pas automatiquement un déplacement (supérieur au signal de base) du centre de

pression si l'excitabilité des muscles n'a pas atteint un certain seuil. Cependant, une absence de déplacement du centre de pression peut être l'expression de la présence des conditions d'équilibre où la somme des forces internes et externes est nulle. Par exemple, une co-activation agoniste antagoniste induit une situation d'équilibre qui pourrait être à l'origine de la non modification du signal de base du centre de pression alors que l'activité EMG est présente.

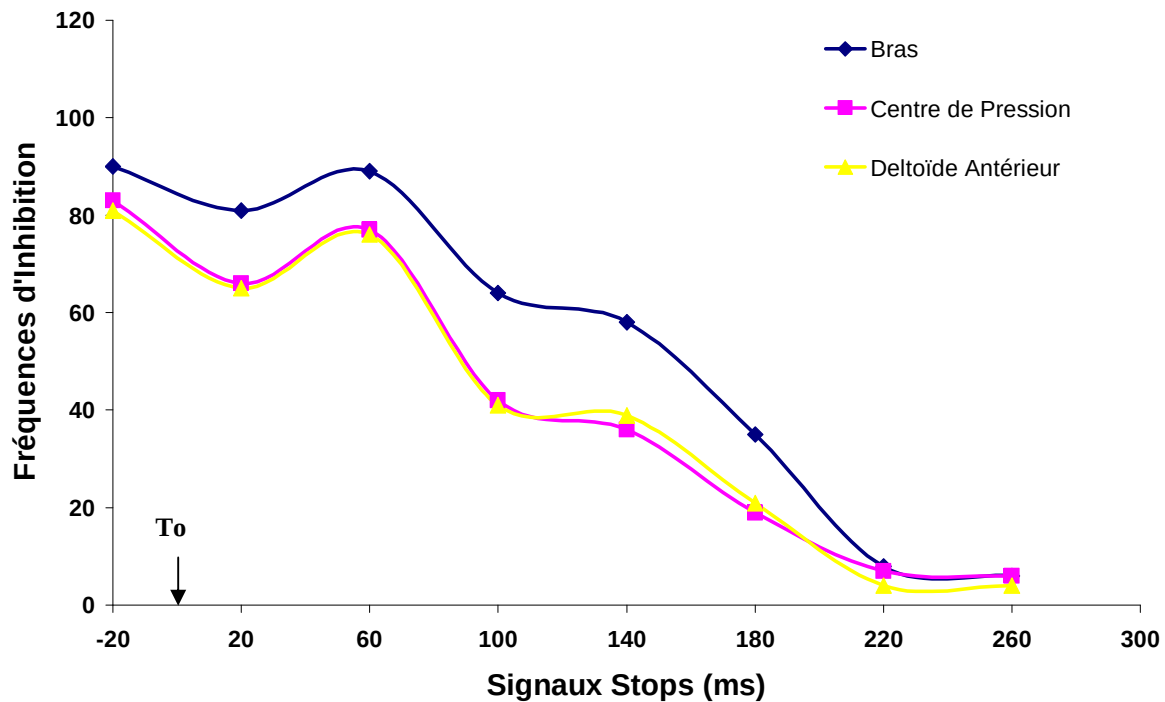


Figure VI-4: Fréquences d'inhibition enregistrées sur le deltoïde antérieur, le centre de pression et le mouvement du bras en fonction des signaux stop en condition réactive chez tous les sujets. L'instant T_0 correspond au moment d'apparition du stimulus de réponse.

3.2.1.3. Détermination des points bi-sériels

Notre but est de dater le moment d'envoi de la commande motrice à partir d'une fonction psychométrique. Cette fonction a été ajustée aux données de tous les sujets et de tous les paramètres mesurés en utilisant le logiciel «psignifit» version 2.5.41 qui met en place la méthode du maximum de vraisemblance décrite par Wichmann et Hill (2001). Ce logiciel permet également, de vérifier la qualité de l'ajustement de la fonction aux données et surtout de calculer la valeur du seuil désiré (point bi-sériel) définie comme la valeur pour laquelle les sujets ont un pourcentage de réussite de 50%.

Différentes fonctions ont été testées (*Weibull*, *Logistic*, *Cumulative Gaussian*, *Gumbel*). Toutes les fonctions produisaient une évaluation similaire des points bi-sériels. Cependant, nous avons retenu la fonction *Weibull*, puisqu'elle produit un meilleur ajustement de la distribution des fréquences d'inhibitions (figure VI-5). L'évaluation des seuils individuels est présentée sur le tableau VI-2. Ces valeurs représentent les temps après la présentation du stimulus visuel (allumage de la diode). Et il semble qu'un SS présenté après ce seuil ne permette pas l'inhibition du paramètre considéré. Nous avons procédé à une analyse ANOVA à mesures répétées du facteur muscle (X4) sur les seuils estimés. Cette analyse a montré un effet significatif du facteur muscle [$F_{(3,27)} = 6.4$, $p < .01$]. Le test *a posteriori* de Tukey a montré que les seuils enregistrés sur le GA et le ST sont significativement inférieurs à celui enregistré sur le DA. C'est-à-dire que l'activité du GA et du ST apparaît plus tôt que celle du DA et que ces muscles (GA, ST) ont moins de chance d'être inhibés que le DA. Le post-hoc montre également que le seuil estimé pour le ST est significativement inférieur à celui enregistré sur le TFL.

Nous avons procédé, par la suite, à des comparaisons entre les seuils enregistrés sur les trois sites d'inhibition : CP, DA et Bras en utilisant Une ANOVA 3 (Sites d'inhibition). Cette analyse a montré des différences significatives des seuils des trois sites [$F_{(2,18)} = 11.68$, $p < .001$]. Le test post-hoc a montré que les seuils estimés sur le CP et le DA sont significativement inférieurs à celui du Bras (tableau VI.2). Ce même test n'a pas montré de différences significatives entre les seuils du CP et du DA (tableau VI.2).

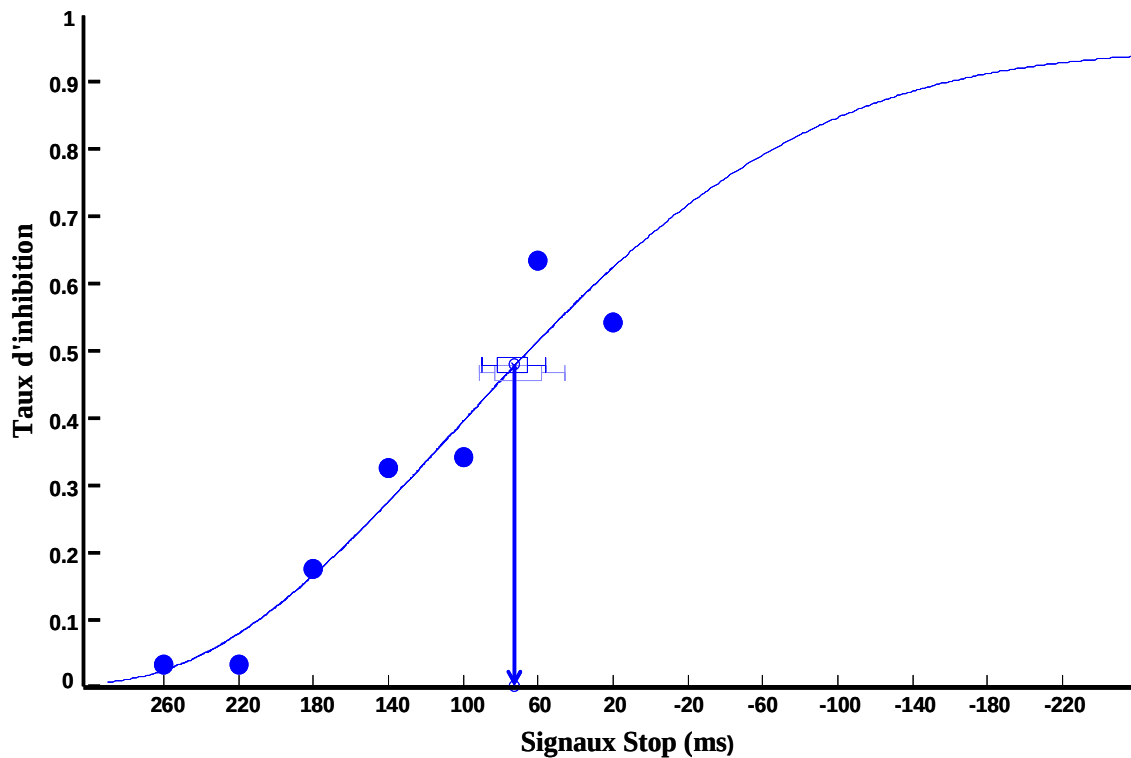


Figure VI-5: Courbe psychométrique selon une fonction de type Weibull. L'ensemble des proportions d'inhibition du Deltoïde Antérieur pour les 10 sujets sont illustrés par les points. La courbe correspond à la fonction de régression calculée sur la totalité des données excepté celles enregistrées sur le signal stop 20 ms. La valeur du seuil estimée à 50% (flèche verticale) est de 73ms.

Tableau VI-2 : Points bi-sériels de chacun des sujets pour chacun des paramètres mesurés.

Sujet	GA	ST	TFL	DA	CP	Bras
1	62	56.6	51.7	62	98.9	113.9
2	53.5	53.5	53.5	53.5	39	68.9
3	102.6	97	107.7	125.7	98	136.4
4	94	88	101.5	101.5	121.5	116.2
5	68.9	68.7	68.9	84.9	85.7	109.3
6	77	71.8	94.5	72.6	115.3	154.9
7	81.9	81.3	102.4	110.8	92.5	131.7
8	58.6	62.7	69.9	68.9	75	124.8
9	77.7	50.4	105.4	119.5	66.4	141.7
10	67.9	65.7	78.6	76.4	89.9	112.4
Moyennes	74.4	69.6	83.4	87.6	88.2	121.0
Ecartypes	15.5	15.2	21.6	25.2	23.9	23.4

Gastrocnémien (GA), Semi-Tendineux (ST), Tenseur du Fascia Latae (TFL), Deltoïde Antérieur (DA), Centre de Pression (CP), mouvement du bras (Bras).

3.2.2. Condition d'Anticipation-Coïncidence

3.2.2.1. Analyse électromyographique

La figure VI-6 montre la fréquence d'inhibition du mouvement du Bras et celle de tous les muscles (X4) en fonction des Signaux Stops (SS). Les SS s'échelonnent de -300 à -20 ms. La principale tendance dans cette condition est une diminution du taux de réussite d'inhibition du mouvement et de l'activité de tous les muscles avec l'augmentation du temps des SS. Plus le SS apparaît tôt par rapport au moment de synchronisation, plus la probabilité d'inhiber les différents paramètres (Bras, muscles) est grande. Dans cette condition, les taux de 100 et 0 % d'inhibition ont été atteints sur les SS -300 et -20 ms respectivement.

Le taux d'inhibition du mouvement de Bras est supérieur de 20% au taux d'inhibition du Deltoïde Antérieur et de 45, 46 et 64 % au taux d'inhibition du GA, TFL et ST respectivement. Comme observé dans la condition réactive, l'inhibition du mouvement du bras n'est pas accompagnée par une inhibition du DA. Donc, l'analyse statistique qui va permettre de comparer l'inhibition posturale et focale prendra en compte l'activité des muscles seulement.

Une ANOVA à mesures répétées sur les fréquences d'inhibition des quatre muscles a montré des différences significatives [$F_{(3,27)} = 54.5, p < .01$]. Le test *a posteriori* de Tukey a montré que le taux d'inhibition du DA (32.7 ± 6.1) est significativement supérieur aux taux d'inhibition des muscles posturaux (22.5 ± 6.6 ; 22.1 ± 5.7 ; 14.6 ± 5.8 pour le GA, TFL et ST respectivement). Le ST présente un taux d'inhibition significativement inférieur à celui du GA et du TFL.

3.2.2.2. Analyse du centre de pression

La figure VI-7 montre la fréquence d'inhibition du mouvement de Bras, du Deltoïde Antérieur (DA) et du centre de pression (CP) en fonction des Signaux Stop (SS). Pour comparer les taux d'inhibition sur ces trois sites (CP, Bras, DA), une ANOVA 3 (Sites d'inhibition) a été effectuée. Les résultats ont montré une différence significative dans l'inhibition des trois sites [$F_{(2,18)} = 45.4, p < .001$]. Le test post-hoc a révélé que le taux d'inhibition du CP est significativement inférieur à celui du DA et du Bras (23.6 ± 3.4 ; 32.7 ± 4.3 ; 41 ± 6.1 ; respectivement pour le CP, DA et Bras).

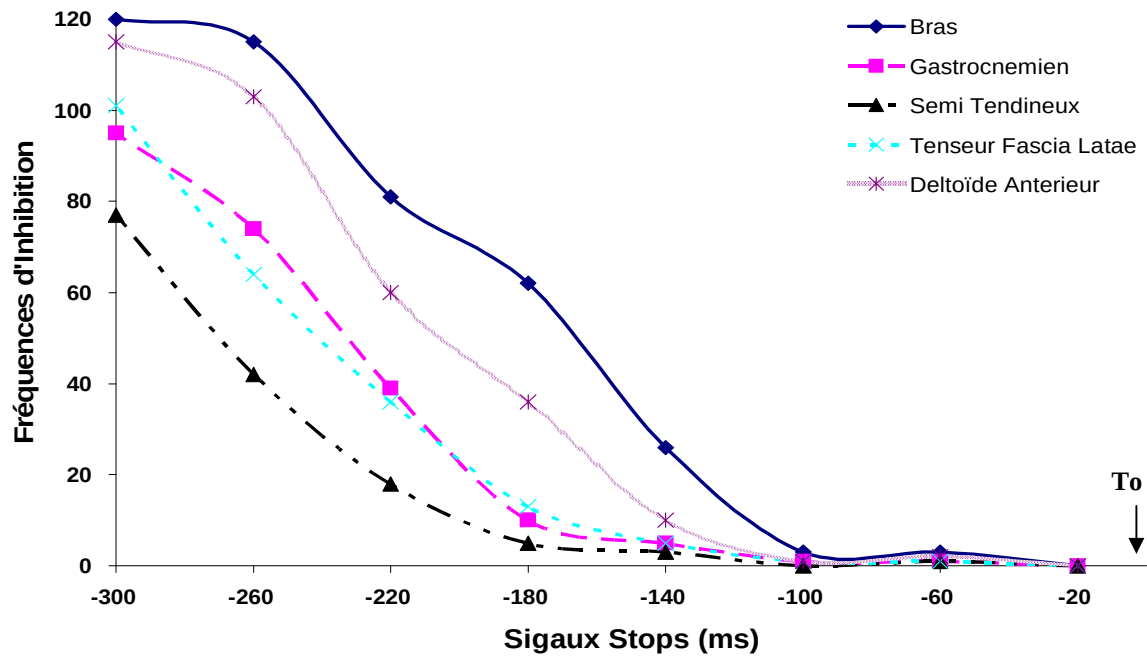


Figure VI-6: Fréquences d'inhibition enregistrées sur les muscles (focal et postural) et sur le mouvement du bras en fonction des signaux stop en condition d'anticipation-coïncidence chez tous les sujets. L'instant T_o correspond au moment de la coïncidence mobile-cible.

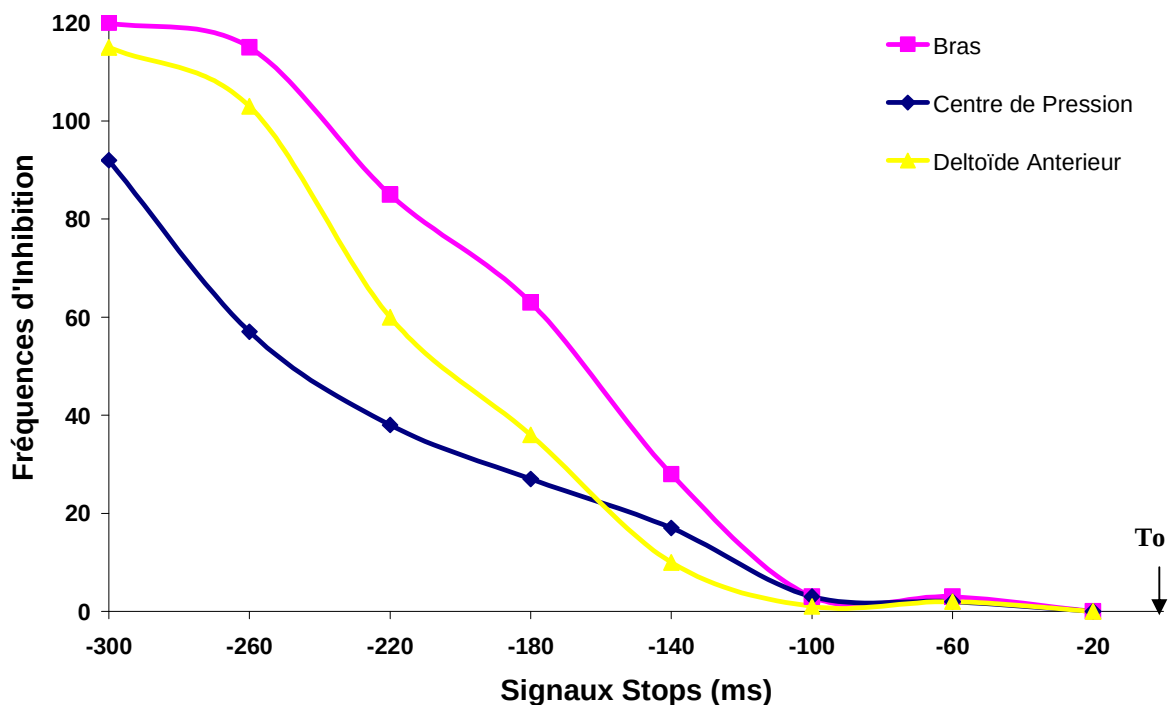


Figure VI-7: Fréquences d'inhibition enregistrées sur le deltoïde antérieur, le centre de pression et le mouvement du bras en fonction des signaux stop en condition d'anticipation-coïncidence chez tous les sujets. L'instant T_o correspond au moment de la coïncidence mobile-cible.

3.2.2.3. Détermination des points bi-sériels

L'évaluation des seuils des points bi-sériels dans cette condition a été effectuée avec la même fonction *Weibull* décrite précédemment (figure VI-8). Notre but étant de dater le moment d'envoi de la commande motrice de chacun des paramètres à partir d'une fonction psychométrique. Il est important de faire en sorte que les réponses des sujets correspondent bien aux stimuli présentés, *i.e.* il faudrait s'assurer de l'attribution de la réponse au bon stimulus. Or, cette estimation se fonde sur la coïncidence de la réponse du sujet avec le passage de la bille sur la cible, ce qui constitue le temps 0. Cependant, les sujets sont rarement synchrones et commettent toujours une certaine erreur d'estimation. Si le sujet tend à répondre après le passage de la bille sur la cible, le temps 0 n'est plus le passage sur la cible, mais bien $0 + \text{biais}$.

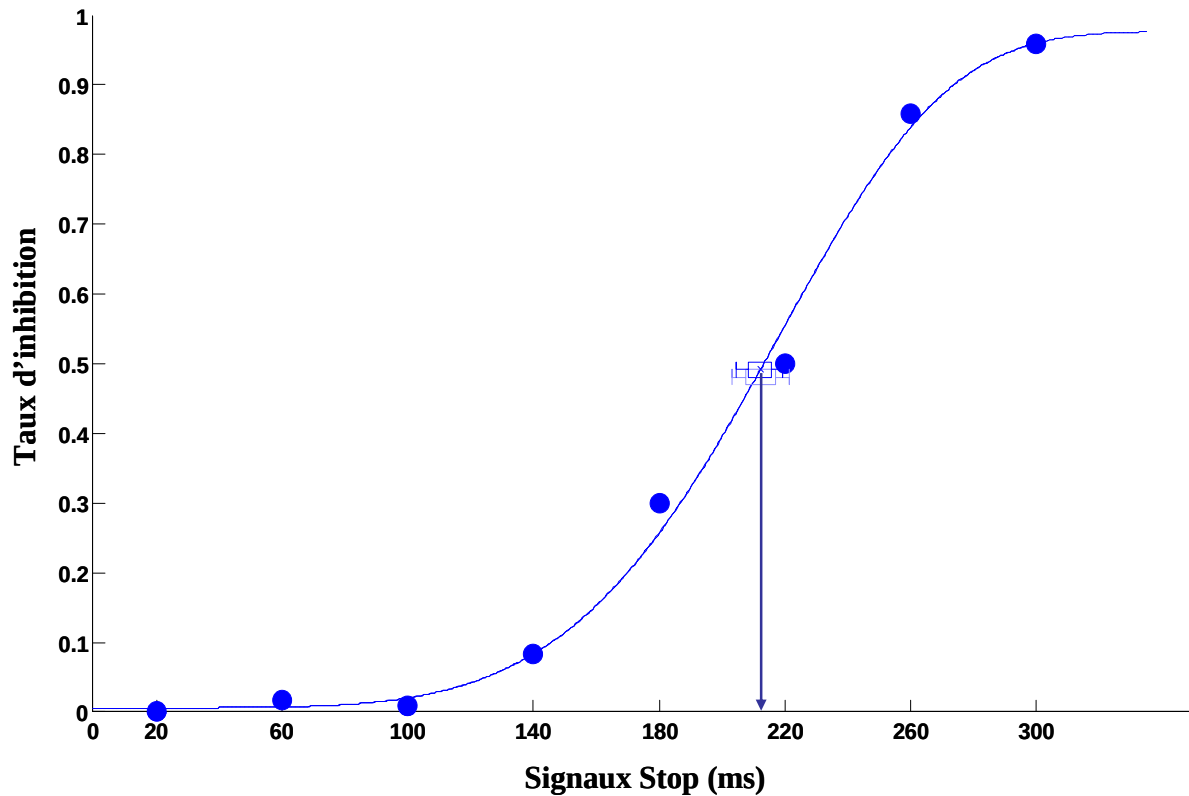


Figure VI-8 : Courbe psychométrique selon une fonction de type Weibull. L'ensemble des proportions d'inhibition du Deltoïde Antérieur pour les 10 sujets sont illustrés par les points. La courbe correspond à la fonction de régression calculée sur la totalité des données. La valeur du seuil estimée à 50% (flèche verticale) est de 212ms.

Deux stratégies de corrections peuvent être envisagées. La première, déjà utilisée par Slater Hammel (1960) consiste simplement à ajouter l'erreur constante moyenne de chacun des sujets aux estimations des périodes réfractaires. Cette procédure suppose *a priori* que le biais des sujets demeure constant tout au long du test. Or, ce biais peut varier, il peut provenir, entre autres, de modifications de l'attention au cours du test, de la succession même des stimuli selon qu'ils sont plus ou moins nombreux sur une période déterminée ou encore de stratégies, dont la plus courante consiste à retarder au maximum sa réponse de sorte à augmenter ses chances de l'inhiber si un stimulus survenait. Larue (2007) a développé une seconde méthode pour corriger le biais local de chaque sujet. Le biais local peut être estimé par la médiane des erreurs constantes sur un intervalle donné. Il s'agit alors de repérer chaque réponse ainsi que le moment où est apparu le stimulus correspondant. L'intervalle d'évaluation est alors centré sur la réponse, et l'erreur constante des essais sans stimulus avant et après cette réponse est calculée. Il s'agit ensuite d'ajouter la valeur de l'erreur constante de cet intervalle à la valeur du stimulus correspondant. Ainsi, chaque stimulus est corrigé en fonction du biais du sujet au moment où est apparu le stimulus. Nous avons tenté d'effectuer cette deuxième méthode à nos données, mais il s'avère que la moyenne des erreurs de synchronisation dans chaque intervalle est inférieure à la valeur du pas des SS qui est de 40ms. C'est donc la méthode utilisée par Slater-Hammel (1960) qui a été adoptée. Les estimations moyennes corrigées par rapport aux erreurs de synchronisation sont représentées en valeurs absolues sur le tableau VI-3. Ces valeurs représentent les temps avant la coïncidence bille-cible, c'est pour cette raison que les valeurs sont complètement différentes de celles enregistrées en condition TRS (tableau VI-2). Une comparaison dans ce sens nécessiterait de calculer la différence entre les temps de réaction et les seuils calculés pour chacun des sujets en TRS. Mais ceci n'est pas notre premier objectif, il s'agit plutôt de comparer les seuils estimés entre les paramètres postural-vs-focal dans chacune des conditions.

Nous avons procédé à une analyse ANOVA à mesures répétées du facteur muscle (X4) sur les seuils estimés en AC. Cette analyse a montré un effet significatif du facteur muscle [$F_{(3,27)} = 44.8, p < .01$]. Le post-hoc de Tukey a montré que le seuil enregistré sur le DA est significativement inférieur aux seuils enregistrés sur les muscles posturaux. Le seuil du ST est significativement supérieur aux seuils du GA et du TFL. Une autre analyse ANOVA 3 (sites d'inhibition) a été utilisée sur les seuils estimés du CP, DA et du Bras. Cette analyse a montré des différences significatives des seuils des trois sites [$F_{(2,18)} = 32.3, p < .001$]. Le test

post-hoc a montré que le seuil estimé sur le CP est significativement supérieur (en valeurs absolues) à ceux du Bras et du DA (tableau VI-3).

Tableau VI.3 : Points bi-sériels survenant avant la coïncidence mobile-cible corrigés par rapport à la moyenne de l'erreur de synchronisation de chaque sujet.

Sujet	GA	ST	TFL	DA	CP	Bras	Erreur Synchro
1	208.8	270.9	243.8	182.0	204.8	151.1	15.2
2	261.7	293.8	287.1	235.0	281.7	192.9	-4.5
3	264.4	326.4	248.6	229.0	275.7	210.1	1.6
4	238.9	280.7	242.5	209.3	230.6	202.5	-11.7
5	247.2	258.3	254.0	223.9	240.9	191.0	5.2
6	261.2	302.6	254.3	232.7	229.1	193.3	-2.6
7	194.1	207.1	193.9	155.2	176.6	150.4	22.9
8	244.8	270.6	255.3	209.4	259.0	149.0	11.2
9	234.1	261.1	231.0	199.3	268.8	182.8	-3.0
10	298.4	302.2	259.9	229.6	313.7	207.3	-3.3
Moyennes	245.4	277.4	247.0	210.5	248.1	183.0	3.1
Ecartypes	29.5	32.6	23.7	25.8	40.1	24.1	10.5

Gastrocnémien (GA), Semi-Tendineux (ST), Tenseur du Fascia Latae (TFL), Deltoïde Antérieur (DA), Centre de Pression (CP), mouvement du bras (Bras).

3.2.3. Réactif vs Anticipation coïncidence

Il est difficile de comparer directement les taux d'inhibitions entre les deux conditions expérimentales puisque les SS ne sont pas équivalents. Une comparaison dans ce sens nécessiterait un ajustement permanent des signaux stop en fonction du temps de réaction (Band et al., 2003) et de l'erreur de synchronisation sur un intervalle donné. Par exemple un SS de 260 ms en TRS correspondrait à un SS de -20 ms en AC lorsqu'un sujet, sur un intervalle d'essais donné, a un temps de réaction moyen de 280 ms en TRS et une synchronisation parfaite en AC. Dans ce cas, le SS intervient exactement à 20 ms de l'exécution du mouvement.

Alors pour comparer les deux conditions, nous proposons deux alternatives :

- 1- Dans la première on sélectionne d'abord les essais qui sont inhibés, c'est-à-dire les essais où il n'y a pas de rupture de contact. Ensuite, on calcule les proportions des différentes combinaisons d'essais représentant l'activation et/ou l'inhibition de l'ensemble des paramètres enregistrés (muscles :DA, GA, TFL, ST ; et le CP). Par

exemple, sur un essai, une activation du DA et une inhibition des muscles posturaux et du CP représente une combinaison. La proportion de cette combinaison sur l'ensemble des essais dans une condition donnée est calculée, puis comparée à l'autre condition par un test statistique **G**.

- 2- La deuxième consiste à calculer les délais des seuils estimés entre le postural et le focal, puis comparer ces délais entre les deux conditions AC et TRS.

3.2.3.1. Combinaison des comportements

Le tableau VI-4 représente les proportions des différentes combinaisons d'activation et d'inhibition de l'ensemble des paramètres pour les deux conditions. Un test statistique **G** est utilisé pour comparer les proportions entre les conditions AC et TRS. A la lecture du tableau, on constate que la plus grande proportion est enregistrée lorsque les paramètres sont tous inhibés (ligne 2). Pour cette combinaison, la proportion en TRS est significativement supérieure à celle enregistrée en AC. Cela veut dire qu'il y a plus de probabilité d'avoir une inhibition totale (tous les paramètres) en condition TRS qu'en condition AC. La deuxième combinaison qui nous intéresse est l'inhibition du muscle focal (DA) et l'activation des composantes posturaux (GA-TFL-ST-CP) (ligne 3). Cette combinaison survient lors de 12.9% des essais en AC contre 2.9% seulement en TRS. Le test G montre une différence significative entre les conditions. Ce résultat va dans le sens de nos hypothèses, à savoir, qu'une inhibition focale est accompagnée par une inhibition postural en TRS alors qu'en AC, on enregistre une activité posturale malgré l'inhibition focale. Pas de différences entre les conditions pour les autres combinaisons, sauf pour « *DA-GA inhibés TFL-ST-CP activés* » (ligne 6). Ces résultats montrent également, malgré l'absence de mouvement, une activation de tous les paramètres autour de 15% pour les deux conditions (ligne1). Inversement, on enregistre une inhibition du CP malgré une activation de certains muscles (lignes 8-9-10-11). Cela signifie que la simple activation des muscles posturaux n'engendre pas forcément un déplacement du CP, mais que ces muscles doivent atteindre un certain seuil. Une autre interprétation donnée précédemment peut justifier l'absence d'activité du CP. L'inhibition de la réponse pourrait impliquer des muscles antagonistes. Une co-activation agoniste antagoniste induit une situation d'équilibre limitant ainsi l'apparition d'une activité du CP supérieure à celle de base. Finalement, on remarque que si le ST est inhibé, tous les autres paramètres sont inhibés.

3.2.3.1. Délais entre les seuils

Les délais entre les seuils estimés (points bi-sériels) des paramètres posturaux et focaux ont été calculés dans chacune des conditions, selon le principe utilisé dans la première partie, à savoir les délais des seuils entre les muscles posturaux et le DA, et le délai entre le seuil du CP à celui enregistré sur l'activité du bras (figure VI-9). Les délais calculés sur les muscles ont été soumis à une ANOVA à mesures répétées 2(Conditions) X 3(Muscle). Il existe des effets significatifs des facteurs principaux Condition et Muscle [$F_{(1,9)} = 36.8$, $p < .01$; $F_{(2,18)} = 14.8$, $p < .01$, respectivement]. Le test post-hoc a révélé que les délais en condition AC sont significativement supérieurs aux délais en condition TRS, et que les délais enregistrés sur le ST sont significativement supérieurs aux délais du GA et du TFL.

Tableau VI.3 : Fréquences et pourcentages d'essais inhibés (contact non rompu) impliquant la même combinaison d'activation ou d'inhibition des différents paramètres.

Inhibé	Activé	Anticipation-Coïncidence		Réactif		Test G	
		Fréquence	Pourcentage de 411	Fréquence	Pourcentage de 435	G	p
-----	Tous	63	15.33	62	14.25	0.04	0.843
Tous	-----	119	28.95	246	56.55	9.07	0.003
DA	GA-TFL-ST-CP	53	12.90	13	2.99	6.66	0.010
DA-TFL	GA-ST-CP	15	3.65	9	2.07	0.44	0.506
DA-GA-TFL-ST	CP	22	5.35	17	3.91	0.23	0.634
DA-GA	TFL-ST-CP	26	6.33	1	0.23	7.10	0.008
DA-GA-TFL	ST-CP	15	3.65	6	1.38	1.06	0.303
CP	DA-GA-TFL-ST	18	4.38	36	8.28	1.22	0.270
CP-DA	GA-TFL-ST	17	4.14	10	2.30	0.53	0.466
CP-DA-TFL	ST-GA	16	3.89	9	2.07	0.57	0.451
CP-DA-GA-TFL	ST	31	7.54	18	4.14	1.01	0.316

Le terme « Tous » désigne tous les paramètres mesurés : Gastrocnémien (GA), Semi-Tendineux (ST), Tenseur du Fascia Latae (TFL), Deltoïde Antérieur (DA), Centre de Pression (CP). Les résultats du test **G** sont représentés sur les deux dernières colonnes de droite. Le test est significatif pour des valeurs de $p < .05$

L'ANOVA a montré également une interaction significative des facteurs [$F_{(2,18)} = 8.2$, $p < .01$]. Cette interaction est due à des différences observées entre les délais enregistrés sur les trois muscles posturaux (GA, TFL, ST) en TRS avec ceux enregistrés en condition AC (figure VI-9). C'est-à-dire que le délai du GA en TRS est significativement inférieur aux délais

enregistrés sur les muscles posturaux en condition AC. Les mêmes observations ont été relevées sur le TFL et le ST.

Une ANOVA 2(Condition) à mesures répétées a été effectuée sur les délais enregistrés entre le seuil du CP et le seuil du Bras. La différence entre les deux conditions est significative [$F_{(1,9)} = 11.5, p < .01$]. Le délai entre les seuils du CP et du Bras en condition AC est significativement supérieur à celui enregistré en TRS (65.05 ± 31 ms ; 32.8 ± 21 ms respectivement en AC et TRS).

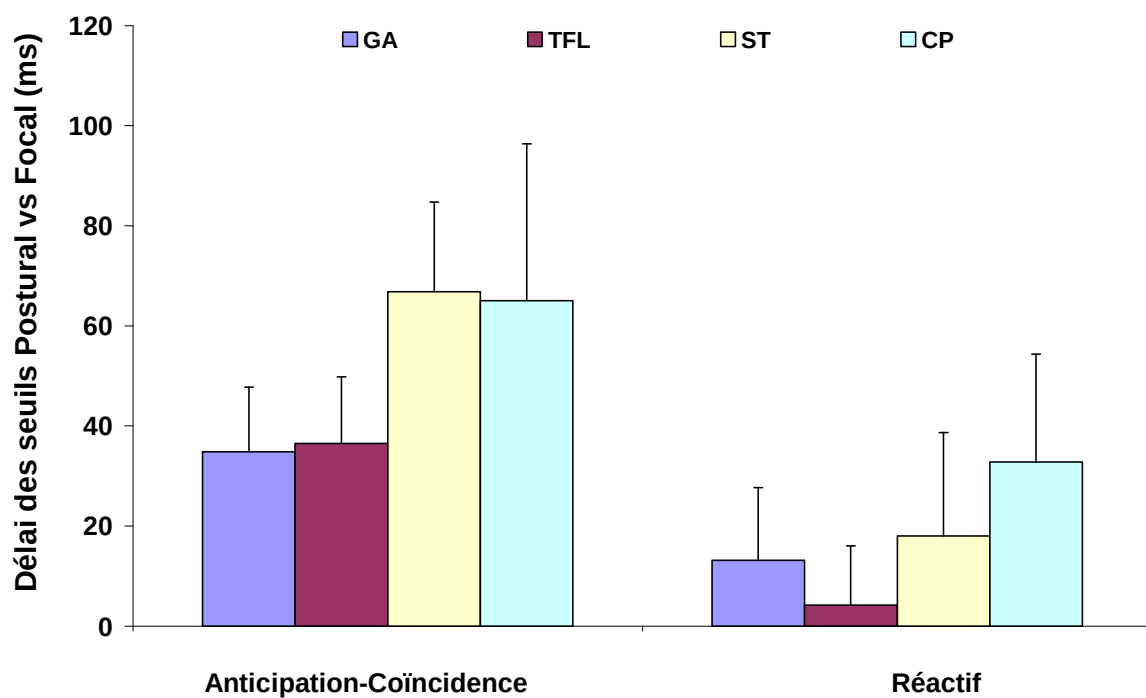


Figure VI-9: Illustration de l'interaction Condition X Délai. Les délais sont calculés entre les seuils estimés sur les muscles posturaux (GA : Gastrocnémien ; TFL : Tenseur du Fascia Latae ; ST : Semi Tendineux) et le seuil estimé du muscle focal (Deltoïde Antérieur) ainsi qu'entre le seuil estimé du centre de pression (CP) à celui de l'accélération. Les valeurs positives signifient que les seuils posturaux sont inférieurs aux seuils focaux.

4. Discussion

L'objectif de cette étude était d'examiner s'il existe différents modes de coordination posture / mouvement qui sont déclenchés par différentes contraintes temporelles. Ainsi, nous avons supposé que les activités posturale et focale sont générées par une seule commande motrice en situation réactive, tel que suggéré par le modèle hiérarchique de coordination posture / mouvement, et par deux commandes distinctes en situation prédictive selon un modèle parallèle. Le paradigme stop combiné aux deux conditions de contraintes temporelles nous a permis de comparer l'inhibition posturale et focale dans chacune des conditions. Une interprétation en termes de course (« race model ») entre le processus de réponse et le processus d'inhibition va nous permettre de confirmer ou d'infirmer nos hypothèses. Mais avant d'aborder cette partie, nous allons nous intéresser aux performances des sujets à l'inhibition.

4.1. Capacité d'inhibition du mouvement

Les pourcentages d'inhibition du mouvement de bras enregistrés au cours de l'expérience nous ont permis de mettre en évidence les relations entre les performances du sujet dans les deux conditions de pression temporelle et leur capacité à inhiber le mouvement. La probabilité d'inhiber diminue avec l'augmentation du signal stop dans les deux conditions. Plus le signal stop s'approche de l'instant de déclenchement (temps de réaction ou coïncidence mobile-cible) plus l'inhibition devient difficile. Ces résultats coïncident avec ceux de la littérature examinant d'autres tâches. Par exemple presser sur un bouton (Logan, 1982, 1984 ; Band, Ridderinkhof & Van der Molen 2003, Morein-Zamir, Nagelkerke, Chua, Franks & Kingstone, 2004), réagir rapidement à un stimulus (TRS) (Lappin & Erikson, 1966 ; Band *et al.*, 2003), déplacer un membre (Henry & Harrison, 1961 ; Lallouche-Boiron & Audiffren, 2008) ou exécuter une tâche en anticipation-coïncidence (Slater-Hammel, 1960 ; Jarrett & Barnes 2003 ; Morein-Zamir *et al.*, 2004 ; Larue 2007 ; Carlsen, Chua, Inglis, Sanderson & Franks, 2008).

En plus des signaux stop, le succès à l'inhibition dépend également du comportement des sujets vis-à-vis de la tâche primaire. Les sujets ayant un temps de réaction long et une erreur de synchronisation positive ont plus de chance de réussir leur inhibition que les sujets ayant un temps de réaction court et une réponse anticipée dans la tâche d'AC. Ces Observations laissent supposer que nos sujets, dans le but de réussir l'inhibition du

mouvement, retarderaient leur réponse. L'analyse des erreurs de synchronisation dans la condition AC ne montre pas un tel comportement. Cinq sujets ont des erreurs de synchronisation négatives (tableau VI.3) et l'erreur moyenne de tous les sujets est assez proche de zéro (3.1 ± 10.5 ms). Cette vérification semble plus difficile à faire dans la condition réactive, étant donné qu'on n'a pas évalué les temps de réaction des sujets en dehors des sessions où le signal stop était intégré. Néanmoins, nous avons comparé la variabilité des temps de réaction dans cette étude avec celle obtenue dans l'étude 2. Il existe une variabilité significativement plus élevée [$t_{(1,18)} = 6.5, p < .01$] dans la présente étude (Moyenne de l'ET 69.1 et 34.6 ms, respectivement pour la présente étude et l'étude 2). C'est peut-être le fait de la différence entre les groupes (réaction différente à la période préparatoire), ou encore le reflet d'une stratégie consistant à retarder volontairement la réponse pour réussir l'inhibition. Cette deuxième option a été limitée par le protocole expérimental en utilisant un faible taux de présentation des signaux stop (25%) (Band, Van der Molen, Logan, 2003 ; Ramautara, Kok, & Ridderinkhof, 2004 ; Larue, 2007). Les taux de réponses à la tâche primaire qui sont relativement élevés aux signaux stop -20 et 20 ms montre bien les limites de cette stratégie de retardement de réponse. Le taux de 100% d'inhibition n'est jamais atteint dans cette condition de TRS, même lorsque le signal stop intervenait avant le signal **Go** (-20ms).

L'activité du muscle deltoïde antérieur et l'absence du mouvement du bras peuvent surprendre. Gratton *et al.* (1988) et De Jong *et al.* (1990) rapportent le même genre d'observations en utilisant des mesures telles que : le potentiel latéral évoqué (PLE), l'activité EMG et la force de pression sur un dynamomètre. De Jong *et al.* (1990) cherchaient à déterminer les traitements sous-tendant les comportements contrôlés mais qui peuvent être inhibés à n'importe quel moment, et les traitements balistiques qui, une fois initiés, arrivent à terme. Le moment où les traitements deviennent balistiques est appelé le point de non retour (Bartlett, 1958 ; Osman *et al.*, 1986 ; Band & Boxtel, 1999). De Jong *et al.* (1990) ont montré que la réponse d'activation au niveau central, reflétée par le PLE, peut être interrompue. En outre, ils ont montré également que la réponse manifeste (mouvement) peut être inhibée jusqu'au moment où elle atteint un certain seuil au niveau musculaire. Band *et al.* (1999) ont interprété l'activité EMG lorsque le mouvement est inhibé comme le résidu de l'activation qui est supprimée à un niveau de traitement précédent. Le processus d'inhibition dans ce cas semble efficace, car le seuil d'activation des muscles ne produit pas de mouvement. Ces conclusions peuvent être appliquées à nos résultats. En effet, l'activation du DA sur certains essais inhibés montre que le processus d'inhibition peut intervenir à un niveau très bas du SN.

De plus, ce processus fonctionnerait à l'économie, en supprimant seulement la force nécessaire à provoquer le déplacement du bras, c'est-à-dire celle qui permettrait de vaincre l'inertie du bras (+ charge), la friction des os et des tendons.

Pour la suite de notre discussion, on considère que toute activation du DA signifie un déclenchement d'une commande focale, puisque il est admis que l'activité musculaire est modulée en amont, dans la chaîne de préparation au mouvement.

4.2. Inhibition posturale et focale et mode de coordination en condition d'anticipation-coïncidence

Les délais enregistrés entre l'activité posturale et focale sur les essais non inhibés correspondent à ceux enregistrés dans l'étude 2 ainsi qu'aux données de la littérature impliquant une condition prédictive (De Wolf *et al.*, 1998 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper *et al.*, 2002). Ces résultats laissent supposer que le mécanisme de préparation correspond bien à une condition prédictive, et que le processus d'inhibition interviendrait sur ce mode de contrôle.

Les données concernant le taux d'inhibition dans cette condition montre bien que l'inhibition focale impliquant le deltoïde antérieur et la rupture de contact est significativement supérieure à celle enregistrée sur les paramètres posturaux (CP ; EMG : GA, TFL, ST). Ces résultats vont dans le sens de notre hypothèse, à savoir une dissociation des commandes postural et focal dans cette condition. Le « race model » (Logan 1994) considère l'inhibition comme une course entre le processus qui génère la réponse et le processus qui génère l'inhibition motrice. Si les processus de la tâche primaire arrivent à terme avant ceux de l'inhibition, la réponse est exécutée, sinon la réponse est inhibée. Dans notre cas et sur certains essais, la réponse posturale est exécutée, tandis-que la réponse focale est inhibée. Donc, le processus d'inhibition a gagné sa course contre l'activité focale. Ceci n'est possible que si les commandes impliquant l'activité posturale et focale sont dissociées.

Plusieurs arguments vont dans le sens de cette interprétation. L'écart entre le taux d'inhibition du postural et du focal est variable entre les signaux stop. Il se trouve que l'écart le plus important se situe autour de -260 ms (figure VI-6 et VI-7). Il est possible qu'à cet intervalle de temps avant le mouvement (coïncidence mobile/cible) la commande posturale soit déjà déclenchée, alors que la commande focale est retardée. Par conséquence, un

mécanisme d'inhibition déclenché à cet instant va gagner sa course contre la commande focale mais pas contre la commande posturale. Les valeurs estimées des seuils convergent dans ce sens. Les seuils (représentant les dates d'envoi des commandes (Slater-Hammel, 1960)) enregistrés sur les muscles posturaux et le CP se situent entre 245 et 277 ms, tandis que celui du DA est estimé à 210 ms. Ces différences dans les dates d'envoi des commandes posturale et focale semble être à l'origine de ces différences dans les taux d'inhibition. Un processus stop qui commence à 260 ms du début du mouvement, a toutes les chances de gagner sa course contre la commande focale qui est déclenchée plus tard, d'autant plus que le temps de réaction au signal stop est estimé, selon la littérature entre 200 et 250 ms. (Logan & Cowan, 1984 ; Logan, 1994 ; Band & Boxtel, 1999)

De fait, lorsque le SS survient avant la date d'envoi des commandes posturales et focales (- 277 ms avant la coïncidence bille/cible), le processus stop peut alors gagner sa course contre les deux commandes impliquant le mouvement car ces commandes ne sont pas encore déclenchées ou elles sont déclenchées mais n'ont pas atteint le point de non retour. C'est pour cette raison qu'on observe des taux d'inhibition à 100 % sur le SS -300 ms. Inversement, si le SS survient après l'envoi des commandes posturale et focale (- 210 ms avant la coïncidence bille/cible), alors le processus d'inhibition perdra sa course contre les deux commandes, Car dans ce cas, les commandes du mouvement (postural et focal) sont déclenchées et ont atteint le point de non retour. Cela est observé à travers des taux d'inhibition proches de 0 % après le SS -140 ms.

4.3. Inhibition posturale et focale et mode de coordination en condition réactive

Le timing entre l'activité focale et posturale sur les essais non inhibés dans cette condition correspond à celui enregistré dans des études antérieures (De Wolf *et al.*, 1998 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper *et al.*, 2002), suggérant ainsi que les sujets exécutent le mouvement selon un mécanisme de contrôle réactif, malgré la présence des signaux stops.

Notre hypothèse prévoyait une inhibition ou une activation simultanée des APAs et de l'activité focale en réactif. Ce comportement est ainsi observé à travers une inhibition quasi identique entre le CP et le DA. Or, de petites différences (mais statistiquement significatives) dans les taux d'inhibition entre les muscles posturaux et le DA ont été trouvées. Il est possible que nos sujets exécutent certains essais dans cette condition selon un mode prédictif. En effet,

dans le but de réussir l'inhibition du mouvement, les sujets retarderaient la réponse en allongeant le temps de réaction. Slijper *et al.* (2002) ont montré que lorsque le temps de réaction est allongé (dans le cas d'un temps de réaction de choix) les sujets avaient des comportements assez proches de ceux observés dans une situation prédictive (auto-initiée). Dans la présente étude, un retardement de la réponse impliquerait un allongement du temps de réaction, et donc un comportement assez proche de celui observé en AC. Un signal stop intervenant sur ces essais produirait un mode d'inhibition similaire à celui observé en AC. En l'occurrence, une inhibition focale qui n'est pas forcément accompagnée par une inhibition posturale. L'argument justifiant la stratégie de retardement de la réponse est la constance dans l'écart d'inhibition des APAs et l'activité focale à travers les SS (entre -20 et 180ms, figure VI-3). Si les commandes posturale et focale sont toujours générées distinctement dans la condition réactive, il devrait y avoir des taux d'inhibition variables entre les signaux stop, comme c'était le cas dans la condition AC. Donc, la différence dans l'inhibition des APAs et de l'activité focale dans cette condition est probablement le résultat d'une stratégie de retardement de la réponse qui intervient indépendamment du délai stop.

L'analyse des combinaisons d'inhibition semblent être en faveur d'une commande unique générant les APAs et l'activité focale. D'abord, sur les essais inhibés (pas de mouvement de bras) on enregistre seulement 3% d'essais où le DA est inhibé et les APAs activés, contre 12% d'essais en condition AC. 71% des essais montrent une activation ou une inhibition simultanée des APAs et du DA, contre 44% en AC. Ensuite, les seuils estimés dans cette condition montrent des dates d'envoi des commandes motrices assez proches (time-locked) entre les APAs et le DA. Ces dates interviennent sur un intervalle de 20 ms. Et enfin, aucune différence n'est obtenue entre les taux d'inhibition du CP et du DA.

4.4. Mécanismes d'inhibition et suppression des commandes postural-focal

Les différences des taux d'inhibition entre les deux conditions AC et TRS peut être le résultat de mécanismes d'inhibition différents, intervenant dans chacune des conditions, et non une différence dans la préparation du mouvement. Les études de neurophysiologie s'accordent sur le rôle principal joué par le lobe frontal et le cortex associatif dans l'inhibition du mouvement (Pfefferbaum, Ford, Weller & Kopell, 1985; Gamba & Sasaki, 1989; Sasaki *et al.*, 1989, 1993, 1996; Roberts *et al.*, 1994; Filipovic *et al.*, 2000; Watanabe *et al.*, 2002). Alors que d'autres études ont suggéré l'existence d'un mécanisme unique d'inhibition

indépendamment de la réponse à exécuter (Logan, 1994 ; Naito & Matsumura, 1995 ; Morein-Zamir *et al.*, 2004). Néanmoins, De Jong *et al.* (1990, 1995) ont proposé deux mécanismes différents du processus d'inhibition. Un mécanisme qui opère en amont du cortex moteur, permettant d'inhiber les processus centraux d'activation. Ce mécanisme est montré par les faibles amplitudes du potentiel latéral évoqué dans les essais inhibés (De Jong *et al.*, 1990, 1995). Un deuxième mécanisme qui opère en aval par rapport au cortex moteur primaire, permettant d'inhiber la transmission des commandes motrices aux structures périphériques. Ce mécanisme a été montré suite à l'inhibition de mouvements induits par une stimulation magnétique transcranienne (Hoshiyama *et al.*, 1997), montrant ainsi une possibilité d'inhibition intervenant sur les voies pyramidales.

Une inhibition opérant en amont du cortex moteur correspond plutôt à nos hypothèses. Car la sélection et la spécification des muscles correspondant au mouvement (postural et focal) sont établies avant d'arriver au cortex moteur (Rossini, Zarola, Stalberg & Caramia 1988; Hallett, Zarola, Stalberg & Caramia, 1991; Tomberg & Caramia, 1991 ; Hoshiyama *et al.*, 1997). C'est à dire que si on enregistre une activation posturale et une inhibition focale cela suppose que les processus postural et focal sont spécifiés indépendamment (c'est le cas en AC). En revanche, une inhibition ou une activation simultanée du postural et du focal signifie une sélection et une spécification commune des muscles générant l'activité posturale et de ceux générant l'activité focale.

Une inhibition opérant en aval du cortex moteur laissera le débat ouvert concernant la programmation des APAs. Car si les commandes motrices sont inhibés après le cortex moteur, cela signifie qu'elles sont déjà toutes spécifiés (y compris leur timing). Alors, nos résultats impliquant une inhibition simultanée ou non simultanée des APAs et de l'activité focale ne nous permettrait pas de conclure en faveur de l'un ou de l'autre mécanisme de coordination entre posture et mouvement.

Une autre alternative consisterait à considérer ces deux mécanismes d'inhibition comme étant un mécanisme unique (Band & Van Boxtel, 1999), mais que l'inhibition intervient à des stades différents en fonction du temps qui la sépare du processus d'activation (signal stop par exemple). Ceci nous revoie donc au « race model » de Logan (1994). De ce fait, nos données obtenues sur les signaux stops précoces impliqueraient une inhibition en

amont du cortex moteur, confirmant ainsi nos hypothèses. Tandis-que les signaux stops tardifs impliqueraient une inhibition en aval du cortex moteur.

Conclusion

(1) Les différences d'inhibition entre l'activité posturale et focale dans la condition prédictive suppose une dissociation des commandes impliquant les composantes posturale et focale du mouvement selon un modèle parallèle.

(2) Dans une situation réactive, les composantes posturale et focale du mouvement sont les conséquences d'une seule commande, tel que le prévoit le modèle hiérarchique. Les petites différences d'inhibition de l'activité posturale et focale dans cette condition sont attribuées à une stratégie de retardement de la réponse de la part des sujets pour réussir l'inhibition. Cette stratégie induirait une préparation au mouvement selon un mode prédictif.

(3) Le processus d'inhibition est unique et peut intervenir en amont ou en aval du cortex moteur en fonction de la contrainte temporelle.

PARTIE 3 : DISCUSSION & CONCLUSION

Discussion générale

Ce travail tente d'établir s'il existe différents modes de gestion de la motricité qui seraient déclenchés par différentes contraintes temporelles. Plus spécifiquement, il s'intéresse aux effets de la pression temporelle sur les APAs et sur la coordination posture / mouvement. Notre but était de déterminer comment les commandes centrales (incluant les composantes posturale et focale) d'un mouvement volontaire, réalisé activement, sont préparées et organisées en fonction du mode de déclenchement, qui eux sont caractérisés par une incertitude temporelle. L'originalité de ce travail réside dans l'utilisation d'une contrainte temporelle impliquant de l'anticipation-coïncidence pour l'étude des APAs dans des tâches actives (simples et complexes).

Afin d'atteindre notre objectif, trois protocoles expérimentaux ont été développés. Dans le premier, nous avons confronté les modes de gestion de la motricité réactive et auto-initié à un geste sportif complexe et à une contrainte temporelle impliquant de l'anticipation-coïncidence. Trois principaux résultats ont été obtenus : 1) les différentes contraintes temporelles influencent la coordination entre l'activité posturale et l'activité focale, ainsi que les patterns temporelles de l'activité posturale. 2) les comportements observés dans la situation d'anticipation-coïncidence sont plus proches de ceux observés dans la condition auto-initiée, montrant ainsi, l'effet de la prédictibilité du moment de déclenchement sur l'organisation de la réponse. 3) Le paradigme prédictif / réactif peut s'étendre à un geste sportif complexe dans une situation impliquant de l'anticipation-coïncidence. A travers les résultats de cette première étude, deux principaux problèmes ont surgi. D'abord, la similarité des comportements entre AC et AI était remise en cause par la grande variabilité enregistrée dans la condition AC. Ceci suppose l'émergence d'un mode de gestion spécifique à la condition AC, et que la similitude entre AC et AI n'était peut être que le résultat du temps de préparation large alloué dans la condition AC et/ou à la lenteur du déplacement du mobile. Ensuite, nous avons inféré nos résultats au modèle de Paillard (1990), en supposant que les commandes générant l'activité posturale et l'activité focale sont couplées ou associées en mode réactif ; autrement dit, il existerait une seule commande motrice générant l'activité posturale et l'activité focale. En revanche, en mode prédictif, les commandes générant l'activité posturale et l'activité focale sont découplées (dissociées). Donc, il existerait deux commandes motrices, l'une générant l'activité posturale et l'autre l'activité focale.

Pour tester ces deux hypothèses, deux expériences ont été rajoutées. Pour cela, l'étude 2 était destinée à vérifier si le mode de coordination posture / mouvement en condition AC était dépendant du temps précédant l'exécution du mouvement, ou constituait un mode de coordination distinct du mode de déclenchement en AC. Pour cette expérience, nous avons décidé d'utiliser une tâche simple de soulèvement de bras. Cette tâche a l'avantage d'avoir été largement étudiée fournissant ainsi une base de comparaison de nos données. L'expérience a impliqué les trois modes de déclenchement TRS, AC et AI. Cependant, nous avons fait varier le temps de déplacement du mobile dans la condition d'AC, en modifiant sa vitesse. Les résultats ont montré une corrélation positive entre la latence des APAs et le temps de déplacement du mobile dans la tâche AC. Néanmoins, pour une vitesse donnée, il existe une similarité des comportements entre les conditions de synchronisation du début ou de la fin du mouvement au stimulus (moment du passage du mobile sur la cible). En prenant en considération le temps de mouvement, il semble logique que le temps précédant l'exécution du mouvement dans la condition de synchronisation sur la fin soit plus court que dans la condition de synchronisation sur le début (pour la même vitesse du mobile). Par conséquent, la coordination posture / mouvement dépend plus de la vitesse du mobile que du temps de son exposition. Dans un deuxième temps, nous avons comparé les comportements observés dans chacune des situations en AC avec les modes TRS et AI. Malgré une tendance de variation de la latence des APAs en fonction du temps précédant l'exécution, les résultats statistiques ont montré un rapprochement entre AC et AI, surtout lorsque la vitesse du mobile est lente et sa durée d'exposition est longue. Il apparaît alors que, lorsque le moment de l'apparition du stimulus de déclenchement du mouvement est prévisible ou que le début du mouvement n'est pas contraint par le temps, le mécanisme de préparation et de programmation de la réponse est toujours le même. Ce mécanisme est caractérisé par une dissociation des commandes posturales et focales. Cependant, la coordination entre ces deux commandes au moment du déclenchement peut être modifiée en fonction des caractéristiques cinématiques du mobile impliqué dans une tâche d'AC.

Enfin, la dernière expérience était réalisée pour tester notre hypothèse selon laquelle le modèle *hiérarchique* de coordination posture / mouvement serait impliqué dans les tâches réactives simples (TRS), alors que le modèle *parallèle* serait impliqué dans des tâches prédictives. Pour cela, nous avons combiné le paradigme stop aux modes de déclenchement TRS et AC. On supposait une inhibition posturale et focale simultanée pour le modèle hiérarchique, et une inhibition focale pas forcément accompagnée d'une inhibition posturale

pour le modèle parallèle. L'hypothèse concernant l'implication du modèle parallèle en mode prédictif a été confirmée. En effet, les différences d'inhibition entre l'activité posturale et focale dans cette condition suppose une dissociation des commandes impliquant les composantes posturale et focale du mouvement. En revanche, l'hypothèse suggérant l'implication du modèle hiérarchique dans la condition TRS semble plus difficile à confirmer, car nous avons observé des petits écarts (statistiquement significatifs) dans les taux d'inhibition des activités posturale et focale. Néanmoins, la comparaison des taux d'inhibition et des points bi-sériels entre les conditions TRS et AC montre des différences significatives entre ces deux conditions. Alors, il est possible que les disparités d'inhibition posturale et focale en TRS soient dues à une modification dans le mécanisme de préparation de la réponse motrice. En effet, si les sujets, sur un essai donné, décident de retarder leur réponse en TRS pour réussir l'inhibition, alors la réponse est préparée selon un mode auto-initié. Dans ce cas, si une inhibition survient, elle devrait être équivalente à celle observée dans la condition AC.

Nous considérerons ci-après, l'ensemble de nos résultats et leurs implications sur les modèles théoriques. Nous poserons par la suite quelques nouvelles hypothèses.

1. Contrainte temporelle et organisation des APAs lors de tâches complexes

La littérature montre que la contrainte temporelle influence la coordination des effecteurs impliquant le haut et le bas du corps dans des tâches n'engageant pas une perturbation posturale (Paillard *et al.*, 1990). Des résultats similaires ont, par la suite, été démontrés sur la tâche largement étudiée de soulèvement de bras impliquant des APAs (Nougier *et al.*, 1999). Les résultats de l'étude 1 ont montré que ce modèle peut s'étendre à des gestes automatiques complexes tels que ceux observés dans le domaine des activités physiques et sportives. La contrainte temporelle influence particulièrement les patterns des APAs et la coordination posture / mouvement. Ainsi, lorsque la contrainte temporelle est forte, on observe un déclenchement synchrone des APAs sur les trois plans du mouvement (sagittal, frontal et vertical), et un retardement de l'apparition de ceux-ci (APAs) au point où ils surviennent presque au même moment que le mouvement focal. Ce type de résultats a été observé dans de nombreuses études (Benvenuti *et al.*, 1990 ; 1997 ; De Wolf *et al.*, 1998 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper *et al.*, 2002). Cependant, les latences des APAs sur les tâches complexes sont augmentées par rapport à celles observées sur des tâches simples (délais obtenus dans l'étude 2). Ce résultat suggère que les APAs varient en fonction de certains

paramètres de la tâche à exécuter, dont la complexité. En conséquence, les APAs sont programmés en fonction de ces mêmes paramètres. Par ailleurs, une tâche complexe engendre une perturbation posturale plus importante. Ainsi, le SNC est capable de prédire le degré de la perturbation pour ensuite optimiser les APAs en les décalant dans le temps. Ce raisonnement semble être en accord avec la théorie de la capacité posturo-cinétique (Bouisset & Le Bozec, 2002). Cette théorie suppose que dans une tâche motrice, la performance de l'activité focale dépend particulièrement de la capacité des composantes posturales à développer une dynamique anticipée efficace (Yiou *et al.*, 2007).

Dans les conditions AC et AI, les latences des APAs sont augmentées par rapport à la condition TRS (étude 1) et par rapport aux mêmes contraintes temporelles mais impliquant une tâche simple (étude 2 et 3). Puisque l'augmentation de la latence des APAs suppose améliorer les conditions de la stabilité posturale (Nougier, 1999), nos résultats suggèrent que les APAs sont optimisés par une augmentation de leurs latences en réponse à la complexité de la tâche et à la prédictibilité du moment de déclenchement. Cependant, nous avons observé que l'augmentation de ces latences est liée à la dimension spatiale du mouvement. Dans l'étude 1, la tâche motrice implique une perturbation importante sur le plan sagittal (axe Y) en raison de la direction du lancé, ensuite sur le plan frontal (axe X) en raison des rotations du tronc. Ainsi, l'augmentation des latences ont été observées principalement sur ces deux axes (135 et 100 ms de plus par rapport à la condition TRS, respectivement pour les axes Y et X). Ceci montre que le SNC a développé une dynamique posturale anticipée en vue d'optimiser la performance de la tâche motrice comme c'est prédit par la théorie posturo-cinétique.

2. L'organisation des APAs et contrainte temporelle : Particularité d'une tâche d'anticipation-coïncidence

Dans les trois expériences que nous avons menées, des différences de coordination entre l'activité posturale et l'activité focale ont été observées. Quelque soit la tâche accomplie (lancé, soulèvement de bras) on assiste à un retardement dans l'apparition des APAs dans la condition TRS comparé aux conditions AC et AI. Ainsi, nos résultats semblent être conformes à ceux de la littérature (Benvenuti *et al.*, 1990 ; 1997 ; De Wolf *et al.*, 1998 ; Nougier *et al.*, 1999 ; Slijper *et al.*, 2002). Cependant, notre travail s'intéresse particulièrement à la tâche d'anticipation coïncidence. L'étude 1 avait montré que les comportements posturo-cinétiques en AC sont assez proche de ceux observés en AI. Il semble que le fait que le SNC prédit le

moment de déclenchement en AC, permet de générer une commande posturale précoce pour préparer les conditions d'équilibre optimums pour l'activité focale, comme dans la condition auto-initiée. Néanmoins, cette prédiction du moment de déclenchement en AC dépend principalement de la capacité du sujet à estimer le temps avant contact (TACt). Ceci se traduit par l'augmentation de la variabilité dans les patterns des APAs tel que nous l'avons observé dans l'étude 1. Nous avons alors suggéré que la programmation des paramètres du mouvement est partielle dans cette condition. Les commandes motrices seront par la suite ajustées en fonction de la nouvelle estimation du (TACt). Or, les résultats de l'étude 2 ont montré une variabilité en AC qui n'est pas différente des conditions TRS et AI. Dans cette étude 2, on s'attendait à voir une grande variabilité au moins dans la condition ACfin, car cette condition est similaire à la condition AC de l'étude 1 où les sujets devaient synchroniser l'impact de la balle (finalité de la tâche) avec le stimulus. La différence dans les effets de la contrainte temporelle sur la variabilité entre les études 1 et 2 ne peut être expliquée qu'à travers la différence dans la tâche motrice. L'utilisation d'une tâche balistique, tel qu'un soulèvement de bras, implique une programmation totale des paramètres du mouvement. Ce mouvement ne peut être modifié même si le sujet perçoit une erreur dans l'estimation du TACt. En revanche, un geste de lancé renferme des séquences non balistiques permettant ainsi une programmation partielle des paramètres du mouvement.

De Wolf *et al.* (1998) et Slijper *et al.* (2002) ont supposé que la coordination posture / mouvement était dépendante du temps précédant le mouvement, puisque la latence des APAs augmente avec l'augmentation du temps pré-moteur. Toutefois, Slijper *et al.* (2002) n'excluent pas l'existence d'une dépendance de cette coordination au mode de déclenchement TRS et AI. Par conséquent, l'objectif de l'étude 2 était de vérifier si la coordination posture / mouvement était dépendante du mode de déclenchement (TRS, AI, AC) ou plutôt du temps précédant le mouvement, tel que suggéré par De Wolf *et al.* (1998) et Slijper *et al.* (2002). Nos résultats ont montré une dépendance sur les deux facteurs, et plus encore, il existerait une dépendance sur les caractéristiques cinématiques du mobile dans la tâche AC. Ainsi, l'augmentation du temps d'exposition du stimulus augmente le temps de préparation du mouvement et la capacité à estimer avec justesse le TACt, ce qui est confirmé par une augmentation de la latence des APAs. Par contre nos résultats n'ont pas montré de différences entre les conditions de synchronisation sur le début et sur la fin. Or, selon la condition de synchronisation, le temps précédant le début du mouvement change. Ce temps devient plus court lorsque les sujets se synchronisent sur la fin, car le temps de mouvement (200 ms) fait,

dans ce cas, partie intégrante du temps avant la cible (**Tac**). Notre conclusion va plutôt dans le sens d'une dépendance inversement proportionnelle des APAs par rapport à la vitesse du mobile. En d'autres termes, la latence des APAs diminue avec l'augmentation de la vitesse du mobile. Il est possible que les sujets se focalisent sur un repère précis et constant, situé sur la trajectoire du mobile, pour déclencher le mouvement quelque soit la vitesse du mobile. A partir de ce repère, la vitesse du mobile rentre en jeu pour influencer l'organisation temporelle des commandes. Ainsi, lorsque la vitesse du mobile est élevée, le TACt à partir du repère devient court et augmente la pression temporelle. Par conséquent, pour répondre aux conditions de la tâche, le SNC déclenche quasi simultanément les commandes posturale et focale. Ce délai entre l'activité focale et l'activité posturale augmente en fonction de l'augmentation du TACt à partir du repère.

Malgré la possibilité de la prédiction du moment de déclenchement en AC, ces dernières conclusions laissent croire que l'augmentation de la vitesse du mobile et la diminution du temps de préparation produirait un mode de coordination similaire à celui observé en TRS. Les situations de vitesse, de **Tac** et de modes de synchronisations testées dans l'étude 2 ne montrent pas ou peu (sur un paramètre au tac 720 ms) de similarité entre les conditions TRS et AC. En revanche, on observe une certaine évolution des comportements en AC vers ceux enregistrés en AI lorsque le **Tac** augmente et/ou la vitesse du mobile diminue. Ce résultat a été montré également dans l'étude 1 lorsque le mobile parcourt sa trajectoire en 5100 ms avant d'atteindre le stimulus. En prenant en considération les résultats de ces deux études, on présume l'existence d'un mode de coordination posture / mouvement typique au mode de déclenchement réactif. C'est un mode qui survient lorsque le moment d'apparition du signal de déclenchement est imprévisible. A l'opposé, il existerait un mode de coordination spécifique aux situations où le moment de déclenchement est prévisible. Ce mode a montré une certaine flexibilité dans l'organisation des commandes posturale et focale, ce qui suggère que ces deux mécanismes sont générés séparément.

3. Coordination posture / mouvement

Nous avons posé l'hypothèse que les variations de coordination entre l'activité focale et l'activité posturale en fonction de la contrainte temporelle sont liées à des modifications des processus centraux générant les commandes posturale et focale. La diminution du délai entre le début des APAs et de l'activité focale dans la condition réactive suppose un déclenchement

quasi simultané des synergies posturale et focale, comme si ces deux activités périphériques étaient les conséquences d'une seule commande centrale. Les résultats de l'étude 3 appuient cette idée. Les points bi-sériels calculés correspondraient au moment de déclenchement des commandes centrales (Slater-Hammel, 1968 ; Larue, 2007 ; Carlsen *et al.*, 2008). Dans la condition réactive, les points bi-sériels calculés sur les muscles posturaux et le muscle focal surviennent dans un intervalle de 17 ms. Pour répondre efficacement aux contraintes de la tâche impliquant un temps de réaction court, le SNC programmerait une seule commande selon un modèle hiérarchique qui fixe les actions de façon rigide (Bouisset, 1991). Les fréquences d'inhibition enregistrées dans cette condition TRS justifient de l'implication de ce modèle hiérarchique. En effets, sur les essais inhibés (absence de mouvement) de l'étude 3, nous avons observé une inhibition identique du CP et du deltoïde antérieur [(DA) ; figure VI-4], et une inhibition presque simultané entre le DA et les muscles posturaux (ST, TFL, GA). Nous avons attribué les différences dans les taux d'inhibition postural vs focal en condition TRS à une possibilité d'un changement de stratégie du sujet en vue de réussir l'inhibition. Ainsi, le sujet retarderait sa réponse, ce qui impliquerait une préparation de mouvement selon un mode prédictif.

Une préparation selon un mode prédictif suppose une dissociation des commandes posturale et focale selon un modèle parallèle. Un tel modèle est beaucoup plus souple dans l'organisation temporelle des synergies posturale et focale. Ainsi, lorsque le moment de déclenchement est prédit, la commande posturale est programmée et est déclenchée largement en avance pour limiter efficacement les perturbations posturales survenant suite au mouvement focal. D'ailleurs, le calcul des points bi-sériels montre que la synergie posturale commence 67 ms (ST) avant le début de l'activité du DA. Cette dissociation des commandes est d'autant plus évidente qu'une large part de l'inhibition focale ne s'accompagne pas d'une inhibition posturale. Tout se passe comme si le processus d'inhibition était engagé contre deux commandes distinctes, et que la commande qui est préparée en premier échappe à l'inhibition (commande posturale), tandis-que la deuxième (commande focale) est stoppée.

La démonstration de l'existence de ces deux modèles (mode réactif et prédictif) par le paradigme stop n'est valide que si le mécanisme d'inhibition peut opérer en amont du cortex moteur. Car si le mécanisme d'inhibition opère uniquement en aval du cortex moteur, il est difficile de conclure en faveur de l'un ou de l'autre modèle de coordination. La figure VII-1 montre les différentes combinaisons de modes de coordination (Hiérarchique vs Parallèle) et

du lieu d'inhibition (en amont ou en aval du cortex moteur). Sur la partie A, on suppose que le processus d'inhibition opère en amont du cortex moteur. Ce modèle est conforme à nos hypothèses, puisque une inhibition focale qui ne s'accompagne pas par une inhibition posturale signifie qu'il existe deux commandes distinctes (partie A à droite). Donc, lorsque les délais stop apparaissent loin du moment de déclenchement, la commande posturale échappe au processus stop, ce qui correspond aux résultats trouvés en condition prédictive. Inversement, si les proportions d'inhibition des APAs et de l'activité focale sont similaires, cela signifie que les activités posturale et focale sont couplées par une seule commande.

Maintenant, si le processus d'inhibition agit en aval du cortex moteur (partie B), il est difficile de se rendre compte de l'association ou de la dissociation des commandes impliquant les APAs et l'activité focale. Même si le niveau auquel s'effectue la coordination entre posture et mouvement reste hypothétique, les données issues de la pathologie supposent l'implication des aires pré-motrices et motrices supplémentaires (Gurfinkel & Elner, 1988) et des ganglions de la base (Bazalgette *et al.*, 1986) ; donc en amont du cortex moteur.

De plus, à partir du cortex moteur, les voies descendantes vers les muscles (posturaux et focaux) impliqués dans le mouvement sont distinctes. Donc, le processus d'inhibition peut toujours réussir à stopper une commande musculaire et échouer sur une autre. L'existence d'un tel mécanisme d'inhibition est montrée par un taux d'inhibition faible du muscle ST comparé aux autres muscles posturaux (TFL et GA), même si ces muscles sont supposés être issus d'une même synergie. Néanmoins, l'étude de De Jong *et al.* (1990) avait montré que le mécanisme d'inhibition pouvait intervenir à différents sites, en amont et en aval du cortex moteur. Ce qui conditionnerait le site d'inhibition est le moment de l'apparition du signal stop. Si le signal stop survient tôt, alors le processus d'inhibition pourrait agir en amont du cortex moteur. Donc, les résultats obtenus sur les taux d'inhibition des activités posturale et focale sont conformes à nos hypothèses sur les modes de coordination posture / mouvement.

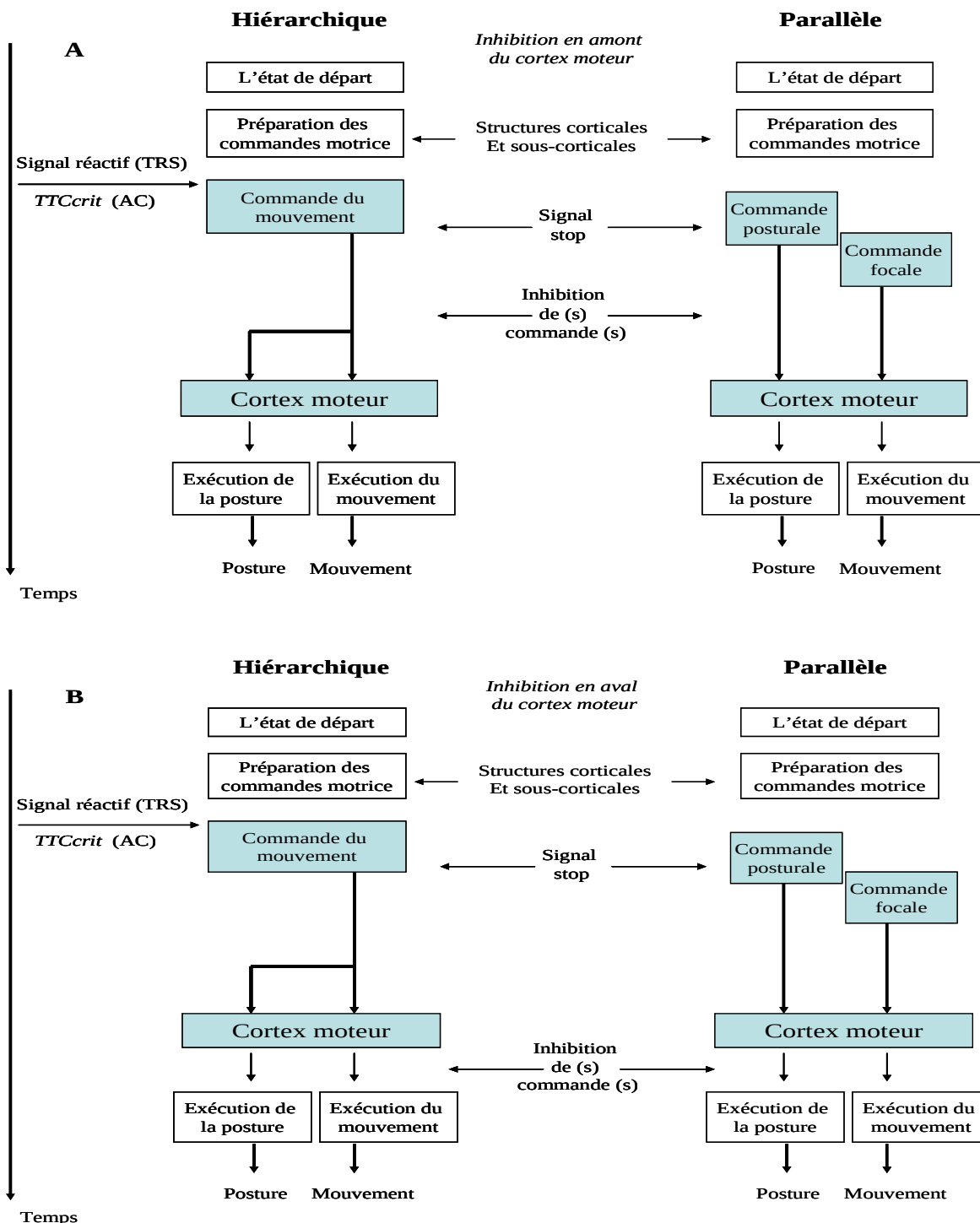


Figure VII-1: Illustration des possibilités de sites d'intervention du processus d'inhibition et son implication sur les modes de coordination posture/mouvement. A : Inhibition en amont du cortex moteur. B : Inhibition en aval du cortex moteur. TTCcrit correspond au temps critique avant contact [variable défini par Trésilien (2005)] dans la condition AC, et « signal réactif » correspond au stimulus go de la condition TRS. C'est à partir de ces deux instants que le sujet doit mettre en action les commandes préprogrammées pour déclencher le mouvement. Cette illustration constitue une hypothèse de travail en perspective.

Conclusions et perspectives

Ce travail de thèse avait pour objectif d'examiner les effets de la contrainte temporelle sur les APAs et sur la coordination posture / mouvement. Nous avons d'abord confronté le paradigme prédictif / réactif (largement exploré sur des tâches simples) à un mouvement sportif impliquant un nombre important de degrés de liberté. Nous avons montré que le modèle peut s'étendre à un geste sportif complexe mais que la complexité de la tâche engendre certaines modifications dans les patterns temporels des APAs lorsqu'ils sont comparés à des tâches simples. Par la suite, nous avons utilisé une contrainte temporelle impliquant de l'anticipation-coïncidence. Nos résultats ont montré que la prédictibilité du moment de déclenchement rapproche cette condition AC du mode de déclenchement auto-initié. Ce qui suggère que ces deux modes de déclenchement partagent des mécanismes de préparation similaires, qui consistent à dissocier les commandes posturale et focale. Cette dissociation se manifeste par le retardement de la commande focale et par la variabilité dans l'inhibition de l'activité posturale et de l'activité focale. En revanche, lorsque le moment de l'apparition du signal de déclenchement est imprévisible telle que dans une situation réactive, le SNC adapte les mécanismes de préparation pour répondre efficacement aux exigences de la tâche. Ainsi, les commandes générant les activités posturale et focale sont associées en une seule commande, tel que le suggère les délais très courts entre le début des APAs et de l'activité focale ainsi que par une inhibition quasi-identique des APAs et de l'activité focale.

L'implication possible des modèles *hiérarchique* et *parallèle* (figure VII-1) en fonction de la contrainte temporelle est intéressante et ouvre la voie à d'autres recherches. Le développement récent des outils de neurophysiologie permettront à terme d'examiner davantage l'inhibition posturale et focale, et de déterminer, en fonction du site d'inhibition, l'association ou la dissociation des commandes.

Notre travail de thèse a également montré que certaines caractéristiques du stimulus et de la tâche motrice en anticipation-coïncidence peuvent modifier la coordination posture / mouvement. Ainsi, l'utilisation d'une tâche motrice complexe et contenant des phases non balistiques augmente la variabilité entre les essais. Nous avons supposé une programmation partielle des paramètres du mouvement lorsque la fin du mouvement est synchronisée avec la coïncidence mobile-stimulus. Les commandes motrices seront par la suite ajustées en fonction de la nouvelle estimation du temps avant la coïncidence mobile-

stimulus. En revanche, sur un mouvement balistique, la variabilité est atténuée jusqu'à ce qu'elle devient équivalente (statistiquement) à la variabilité enregistrée dans les situations TRS et AI. De plus, le type de synchronisation du début ou de la fin du mouvement avec la coïncidence mobile-stimulus ne modifie ni la coordination posture / mouvement ni la variabilité. Alors nous avons suggéré une programmation totale des paramètres du mouvement sur les mouvements balistiques.

Par ailleurs, nous avons montré une augmentation de la latence des APAs avec l'augmentation du temps parcouru et/ou la diminution de la vitesse du mobile. Il est possible que ces facteurs interagissent pour influencer la coordination posture / mouvement. Nous avons attribué principalement ces effets à la vitesse du mobile. En effet, lorsque la durée de préparation est variée naturellement par les types de synchronisation début vs fin, les comportements posturo-cinétiques sont similaires. Pour isoler les effets de la durée et de la vitesse sur la coordination posture / mouvement, il serait intéressant de manipuler la vitesse du mobile indépendamment de la durée, et la durée indépendamment de la vitesse. Pour se faire, il suffit de varier la distance parcouru par le mobile avant d'atteindre la cible.

Références Bibliographiques

- Allen G.I. & Tsukahara N., (1974). Cerebellar communication systems. *Physiological Review*, 54, 957-1006.
- Aron A.R. & Poldrack R.A. (2006). Cortical and subcortical contributions to Stop signal response inhibition: role of the subthalamic nucleus. *The Journal of Neuroscience*, 26, 2424-2433.
- Aruin A.S. & Latash M.L. (1995b). Directional specificity of postural muscles in feed-forward postural reactions during fast voluntary arm movements. *Experimental Brain Research*, 103, 323-332.
- Aruin A.S. & Latash M.L. (1996). Anticipatory postural adjustments during self-initiated perturbations of different magnitude triggered by a standard motor action. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 101, 497-503.
- Aruin A.S. & Zatsiorsky V.M. (1989). Ergonomicheskaia Biomechanika. *Occupational Biomechanics*. Maschinostroenie, Moscow.
- Aruin A.S. (2002). The Organization of Anticipatory Postural Adjustments. *Journal of Automatic Control, University of Belgrade*, 12, 31-37.
- Aruin A.S., Shiratori T. & Latash M.L. (2001). The role of action in postural preparation for loading and unloading in standing subjects. *Experimental Brain Research*, 138, 458-466.
- Aruin A.S., Shiratori T. & Latash M.L. (2003). The role of action in postural preparation for loading and unloading in standing subjects. *Experimental Brain Research*, 138, 458-466.
- Aruin A.S., & Latash M.L. (1995a). The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations. *Experimental Brain Research*, 106, 291-300.
- Babinski J. (1899). De l'asynergie cérébelleuse. *Review of Neurology*, 7, 806-816.
- Band G.P. & van Boxtel G.J. (1999). Inhibitory motor control in stop paradigms: review and reinterpretation of neural mechanisms. *Acta Psychologica*, 101, 179-211.
- Band G.P., van der Molen M.W. & Logan G.D. (2003). Horse-race model simulations of the stop signal procedure. *Acta Psychologica*, 112, 105-142.
- Band G.P.H., Ridderinkhof R. & van der Molen M.W. (2003). Speed-accuracy modulation in case of conflict: the roles of activation and inhibition. *Psychological Research*, 67, 266-279.
- Bard C., Fleury M., Gagnon M., Michaud D., Teasdale N. & Proteau L. (1995). The transfer of perceptual and /or motor training to the performance of a coincidence-anticipation task *Journal of Experimental Child Psychology*, 59, 32-48.

- Bard C., Paillard J., Lajoie Y., Fleury M., Teasdale N., Forget R. & Lamarre Y. (1992). Role of afferent information in the timing of motor commands: A comparative study with deafferented patient. *Neurophysiologia*, 30, 201-206.
- Bard P. & Macht M.B. (1958). The behaviour of chronically decerebrated cats. In: *Neurological Basis of behaviour*. Londres, Churchill.
- Bartlett F.C. (1932). *Remembering : a study in experimental and social psychology*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Bartlett F. (1958). *Thinking: An experimental and social study*. London: Allen and Church.
- Bazalgette D., Zattara M., Bathien N., Bouisset S. & Rondot P. (1987). Postural adjustments associated with rapid voluntary arm movements in patients with Parkinson's disease. *Advances Neurology*, 45, 371-374.
- Beek P.J. & Santvoord A.A. (1996). Dexterity in cascade juggling. In: *Latash ML, Turvey MT (Eds) : Dexterity and its development*, pp: 377-392. Erlbaum, Mahwah, N.J
- Belenkii V.Y., Gurfinkel V.S. & Paltsev Y.I. (1967). Elements of control of voluntary movements. *Biofisika*, 10, 135-141.
- Benguigui N., Broderick M. & Ripoll H. (2004). Age differences in estimating arrival-time. *Neuroscience Letters*, 369, 197-202.
- Benguigui N. & Ripoll H. (1998). Effects of tennis practice on the coincidence timing accuracy of adults and children. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69, 217-223.
- Benvenuti F., Panzer V., Thomas S. & Hallett M. (1990). Kinematics and EMG analysis of postural adjustments associated with fast elbow flexion movements. In *Brandt T., Paulus W., Bles W., Dieterich M., Krafczyk S. and Straube A. (Eds.): Disorder of Posture and Gait*, pp: 137-141. Stuttgart: Thieme.
- Benvenuti F., Stanhope S.J., Thomas S.L., Panzer V.P. & Hallett M. (1997). Flexibility of anticipatory postural adjustments revealed by self-paced and reaction-time arm movements. *Brain Research*, 761, 59-70.
- Béraud P., Gahery Y. & Fabre J.C. (1990). Rôle de l'apprentissage en boxe française dans l'organisation des ajustements posturaux liés aux mouvement des jambes: comparaison entre tireurs débutants et confirmés. In: *Laurent, M., Marini, P.F., Pfister, R. & Therme, P. (Eds.): Recherches en A.P.S. 3*, pp:255-26. Marseille : Publication du centre de recherche UEREPS.
- Bernstein N. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford, England, Pergamon press.
- Berthoz A., (1991). Reference frames for the perception and control of movement. In: *Brain and space, J. Paillard (Eds)*, pp: 81-111. Oxford University Press, Oxford.

- Bleuse S., Cassim F., Blatt J.L., Defebvre L., Derambure P. & Guieu J.D. (2005). Vertical torque allows recording of anticipatory postural adjustments associated with slow, arm raising movements. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 20, 693-699.
- Bleuse S., Cassim F., Blatt J.L., Defebvre L. & Guieu J.D. (2002). Anticipatory postural adjustments associate with arm flexion: interest of the vertical torque. *Clinical Neurophysiology*, 32, 352-360.
- Bleuse S., Cassim S., Blatt J.L., Labyt E., Derambure P., Guieu J.D. & Defebvre L. (2006). Effect of age on anticipatory postural adjustments in unilateral arm movement. *Gait & Posture*, 24, 203-210.
- Blouin J., Bard C., Teasdale N., Paillard J., Fleury M., Forget R. & Lamarre Y. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. *Experimental Brain Research*, 93, 324-331.
- Blouin J.S., Bard C., Doyon J. & Paillard J. (2004). Contribution of the cerebellum to feedforward timing of motor command: a PET study. *Experimental Brain Research*, 155, 63-68.
- Bootsma R.J. & van Wieringen P.C.W. (1990). Timing and attacking forehand drive in table tennis. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 16, 21-29.
- Bouisset S., (1991). Relation between postural support and intentional movement: Biomechanical approach. *Archives Internationales de Physiologie, de Biochimie et de Biophysique*, A77-A92.
- Bouisset S., Zattara M. (1981). A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neuroscience Letters*, 22, 263-270.
- Bouisset S. & Zattara M. (1990). Segmental movement as a perturbation to balance? Facts and concepts. In: *Winters J.M. & Woo S.L. (Eds.). Multiple muscle systems, Biomechanics and Movement Organization*, pp: 498-506. New York: Springer
- Bouisset S., Richardson J. & Zattara M. (2000a). Do anticipatory postural adjustments occurring in different segments of the postural chain follow the same organisational rule for different task movement velocities, independently of the inertial load value? *Experimental Brain Research*, 132, 79-86.
- Bouisset S., Richardson J. & Zattara M. (2000b). Are amplitude and duration of anticipatory postural adjustments identically scaled to focal movement parameters in humans? *Neuroscience Letters*, 278, 153-156.
- Bouisset S. & Zattara M. (1983). Anticipatory postural movements related to voluntary movement. In: *Physiologie spatiale. Cepadues (Eds)*, pp : 137-141. Toulouse.
- Bouisset S. & Zattara M. (1987). Biomechanical study of the programming of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement. *Journal of Biomechanics*, 20, 735-742.

- Bouisset S. & Le Bozec S. (2002). Posturo-kinetic capacity and postural function in voluntary movements. In: *Latash M.L. (Eds.), Progress in Motor Control, vol. II, Structure–Function Relations in Voluntary Movements*: pp: 25-52). Champaign, Human Kinetics.
- Boussaoud D., Barth T.M. & Wise H. (1993). Effects of gaze on apparent visual responses of frontal cortex neurons. *Experimental Brain Research*, 93, 423-434.
- Brenière Y., Do M.C. & Bouisset S. (1987). Are dynamic phenomena prior to stepping essential to walking ? *Journal of Motor Behaviour*, 19, 62-76.
- Brooks D.J. (1995). The role of the basal ganglia in motor control: contributions from PET. *Journal of the Neurological Sciences*, 128, 1-13.
- Brooks V.B. & Thach W. (1981). Cerebellar control of posture and movement. In: *Brooks, V.B. (Eds.), Handbook of Physiology. American Physiology Society, Motor Control*, pp : 877-946. Washington, DC.
- Brooks V.B. & Thach W.T. (1981). Cerebellar control of posture and movement. In: *Brooks V.B. Handbook of Physiology. The Nervous System II. American Physiological Society. Bethesda (Maryland)*.
- Brown J.E. & Frank J.S. (1987). Influence of event anticipation on postural actions accompanying voluntary movement. *Experimental Brain Research*, 67, 645-650.
- Carlsen A.N., Chua R., Inglis J.T., Sanderson D.J. & Franks I.M. (2008). Motor preparation in an anticipation-timing task. *Experimental Brain Research*, 190, 453-461.
- Chevrier A.D., Noseworthy M.D. & Schachar R. (2007). Dissociation of response inhibition and performance monitoring in the stop signal task using event-related fMRI. *Human Brain Mapp*, 28, 1347-1358.
- Chocholle R. (1936). Les temps de reaction. *Traité de psychologie expérimentale*, 2. Paris, Privat.
- Clement G., Gurfinkel V.S., Lestienne F., Lipshits M.I. & Popov K.E. (1984). Adaptation of postural control to weightlessness. *Experimental Brain Research*, 57, 61-72.
- Cole J. & Paillard J. (1995). Living without touch and information about body position and movement. Studies on deafferented subjects. In: *Bermudez J., Marcel A. & Iylan N. (Eds). The Body and the Self*, pp: 245-266. The MIT Press, Cambridge Mass.
- Collet C. (2002). *Mouvement et cerveau. Neurophysiologie des activités physiques et sportives*. Collections Sciences et pratiques du sport. De Boek Université.
- Cordo P.J. & Nashner L.M. (1982). Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements. *Journal of Neurophysiology*, 47, 287- 302.
- Cuisinier R., Olivier I. & Nougier V. (2005). Effects of foreperiod duration on anticipatory postural adjustments: determination of an optimal preparation in standing and sitting for a raising arm movement. *Brain Research Bulletin*, 66, 163-170.

- Cunnington R., Windischberger C., Deecke L. & Moser E. (2002). The preparation and execution of self-initiated and externally-triggered movement: A study of event-related fMRI. *Neuroimage*, 15, 373-385.
- De Jong R., Coles M.G.H. & Logan G.D. (1995). Strategies and mechanisms in nonselective and selective inhibitory motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 498-511.
- De Jong R., Coles M.G.H., Logan G.D. & Gratton G. (1990). In search of the point of no return: the control of response processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 164-182.
- De Wolf S., Slijper H. & Latash M.L. (1998). Anticipatory postural adjustments during self-paced and reaction-time movements. *Experimental Brain Research*, 121, 7-19.
- Deecke L., Grozinger B. & Kornhuber H.H. (1976). Voluntary finger movement in man: cerebral potentials and theory. *Biological Cybernetics*, 23, 99-119.
- Deecke L., Scheid P. & Kornhuber H.H. (1967). Distribution of readiness potential, pre-motion positivity and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movement. *Experimental Brain Research*, 7, 158-168.
- Deiber, M. P. (1998). Cerebral processes related to higher motor control studied with PET. *International Journal of Psychophysiology / Abstract*, 30, 7-94.
- Deliagina T.G., Beloozerova I.N., Zelenin P.V. & Orlovsky G.N. (2008). Spinal and supraspinal postural networks. *Brain Research Reviews*, 57, 212-221.
- Dietz V, Trippel M, Discher M, Horstmann GA. (1991). Compensation of human stance perturbations: selection of the appropriate electromyographic pattern. *Neuroscience Letters*, 126, 71-74.
- Dietz U., Gollhoffer A., Kleiber M. & Trippel M. (1992). Regulation of bipedal stance: dependence on load receptors. *Experimental Brain Research*, 89, 229-231.
- Do M.C. & Yiou E. (1999). Do centrally programmed anticipatory postural adjustments in fast stepping affect performance of an associated “touche” movement? *Experimental Brain Research*, 129, 462–466.
- Do M.C., Nouillot P.H. & Bouisset S. (1991). Is balance or posture at the end of the voluntary movement programmed? *Neuroscience Letters*, 130, 9-11.
- Donders F.R. (1868). On the speed of mental processes. In: *Koster W.G. (Eds.), Attention and performance II*, pp: 412-431. Amsterdam: North-Holland.
- Drazin D.H. (1961). Effects of foreperiod, foreperiod variability, and probability of stimulus occurrence on simple reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 62, 43-50.

- Dufossé M., Hugon M., Massion J. (1985). Postural forearm changes induced by predictable in time or voluntary triggered unloading in man. *Experimental Brain Research*, 60, 330-334.
- Dumoulin J., DeBisschop G. & Petit B. (1993). *Posture et mouvement, analyse par électromyographie intégrée*. Masson, Paris.
- Erdler M., Windischberger C., Lanzenberger R., Edward V., Gartus A., Deecke L. & Beisteiner R. (2001). Dissociation of supplementary motor area and primary motor cortex in human subjects when comparing index and little finger movements with functional magnetic resonance imaging. *Neuroscience Letters*, 313, 5-8.
- Ferry M., Martin L., Termoz N., Côté J. & Prince F. (2004). Balance control during an arm raising movement in bipedal stance: which biomechanical factor is controlled? *Biological Cybernetics*, 91, 104-114.
- Filipovic´ S.R., Jahanshahi M. & Rothwell J.C. (2000). Cortical potentials related to the nogo decision. *Experimental Brain Research*, 132, 411-415.
- Fitts P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Fleury M., Macar F., Bard C., Teasdale N., Paillard J., Forget R. & Lamarre Y. (1994). Production of short timing responses: a comparative study with a deafferented patient. *Neuropsychologia*, 32, 1435-1440.
- Fleury M., Basset F., Bard C. & Teasdale N. (1998). Target speed alone influences the latency and temporal accuracy of interceptive action. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52, 84-92.
- Forget R. & Lamarre Y. (1990). Anticipatory postural adjustment in the absence of normal peripheral feedback. *Brain Research*, 508, 176-179.
- Friedli W.G., Cohen L., Hallett M., Stanhope S. & Simon S.R. (1988). Postural adjustments associated with rapid voluntary arm movements. II. Biomechanical Analysis. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 51, 232-243.
- Friedli W.G., Hallett M. & Simon S.R. (1984). Postural adjustments associated with rapid voluntary arm movements. Electromyographic data. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 51, 232-243.
- Gagnon M., Bard C., Fleury M., & Michaud D. (1991). Influence de la vitesse sur la stratégie de partage de temps lors d'une tâche d'anticipation-coïncidence chez des enfants de 6 à 10 ans. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 11, 537-554.
- Gahéry Y. & Massion J. (1981). Co-ordination between posture and movement. *Trends in Neurosciences*, 4, 199-202.
- Gahéry Y. & Nieoullon A. (1978). Postural and kinetic coordination following cortical stimuli which induce flexion movements in the cat's limbs. *Brain Research*, 155, 25-37.

- Gahéry Y. (1987). Associated movements, postural adjustments and synergies: some comments about history and significance of three motor concepts. *Archives Italiennes de Biologies*, 125, 345-360.
- Gemba H. & Sasaki K. (1989). Potential related to no-go reaction of go/no-go hand movement task with colour discrimination in human. *Neuroscience Letters*, 101, 263-268.
- Gibson J.J. (1951). What is form?. *Psychological Review*, 58, 403-412.
- Gibson J.J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston, Houghton Mifflin.
- Gibson J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, Houghton Mifflin.
- Goldberg G. (1984). Response and projection : A reinterpretation of the premotor concept. In: Roy E.A. (Eds), *Neuropsychology of apraxia and related disorders*, Part 2, pp: 251-266. Amsterdam, Elsevier, North Holland.
- Goldberg G. (1985). Supplementary motor area structure and function: review and hypothesis. *The Behavioral and Brain Sciences*, 8, 567-612.
- Gratton G., Coles, M.G.H., Sirevaag E., Eriksen C.W. & Donchin E. (1988). Pre- and post-stimulus activation of response channels: A psychophysiological analysis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 331-344.
- Gurfinkel V.S. (1973). On two types of static disturbances in patients with local lesions of the brain. *Agressologie*, 14, D, 65-72.
- Gurfinkel V.S. & Shik M.L. (1973). The control of posture and locomotion. In: Gydikov A.A., Tankov, N.T. & Kosarov, D.S. (Eds), *Motor Control*, pp : 217-234. Plenum press, New York.
- Gurfinkel V.S., Levik Y.S., Popov K.E. & Smetanin B.N. (1988). Body scheme in the control of postural activity. In: *Gurfinkel, V.S., Ioffe, M.E., Massion, J. & Roll, J.P. (Eds.), Stance and motion: facts and concepts*, pp: 185-193. Plenum Press, New York.
- Gurfinkel V.S., Lipshits M.I. & Popov K.E. (1981). Stabilization of body position as the main task of postural regulation. *Fiziologiya Cheloveka*, 7, 400-410.
- Hallett M., Cohen L.G. & Bierner S.M. (1991). Studies of sensory and motor cortex physiology: with observations on akinesia in Parkinson's disease. In: *Levy W.J., Cracco R.Q., Barker A.T. and Rothwell J. (Eds.), Magnetic Motor Stimulation: Basic Principles and Clinical Experience. Electroenceph. & clinical Neurophysiology*. Suppl. 43, pp: 76-85. Elsevier, Shannon.
- Hay L. & Redon C. (1999). Feedforward versus feedback control in children and adults subjected to a postural disturbance. *Experimental Brain Research*, 125, 153-162.
- Head H. & Holmes G. (1911-1912). Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 102-245.

- Henry F.M. & Harrison J.S. (1961). Refractoriness of a fast movement. *Perceptual & Motor Skills*, 13, 351-354.
- Henry F.M. & Rogers D.E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a 'memory drum' theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, 31, 448-458.
- Hess W.R. (1943). Teleokinetisches und ereismatisches Kräftesystem in der biomotorik. *Helv. Physiol. Pharmacol., acta* 1, C62-C63.
- Heuer H. (1988). The laboratory and the world outside. In: *Meijer O.J. & Roth K. Complex movement behavior: "The motor action controversy"*, pp: 405-407. Elsevier Sciences Publishers, North-Holland.
- Hick W.E. (1952). On the rate of gain information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 2-26.
- Hong D.A., Cheung T.K. & Roberts E.M. (2001). A three-dimensional, six-segment chain analysis of forceful overarm throwing. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11, 95-112.
- Horak F.B., Macpherson J.M. (1996). Postural orientation and equilibrium. In: *Rowell L.B., Shepard J.T. (Eds). Handbook of Physiology: Section 12, Exercise Regulation and Integration of Multiple Systems*, pp: 255-292. New York: Oxford University Press.
- Horak F.B., Esselman P., Anderson M.E., Lynch M.K. (1984). The effects of movement velocity, mass displaced, and task certainty on associated postural adjustments made by normal and hemiplegic individuals. *Journal of Neurology, Neurosurgery and psychiatry*, 47, 1020-1028.
- Horak F.B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing*, 35, Suppl 2:ii7-ii11.
- Hoshiyama M., Kakigi R., Koyama S., Takeshima Y., Watanabe S. & Shimojo M. (1997). Temporal changes of pyramidal tract activities after decision of movement: a study using transcranial magnetic stimulation of the motor cortex in humans. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 105, 255-261.
- Hyman R. (1953). Stimulus information as a determinant of reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 45, 188-196.
- Ilmane N. & LaRue J. (2008). Modulation of anticipatory postural Adjustments in a complex task under different temporal constraints. *Motor Control*, 12, 330-347.
- Inglis B. & Woollacott M. (1988). Age-related changes in anticipatory postural adjustments associated with arm movements. *Journal of Gerontology*, 43, 105-113.
- Jarrett C.B. & Barnes G.R. (2003). The volitional inhibition of anticipatory ocular pursuit using a stop signal. *Cognitive Brain Research*, 17, 759-769.
- Jeannerod M., (1983). *Le cerveau machine, physiologie de la volonté*. Fayard, France.

- Keele S.W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387-403.
- Kelso J.A. & Fuchs A. (1995). Self-organizing dynamics of the human brain: Critical instabilities and Sil'nikov chaos. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 5, 64-69.
- Klemmer E.T. (1956). Time uncertainty in simple reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 51, 179-84.
- Kornhuber H.H. & Deecke L. (1965). Hirnpotentialänderungen bei Willkurbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Archiv*, 284, 1-17.
- Kutas M. & Donchin E. (1980). Preparation to respond as manifested by movement-related brain potentials. *Brain Research*, 202, 95-115.
- Lacquaniti F., Maioli C. (1989a). The role of preparation in turning anticipatory and reflex responses during catching. *Journal of Neuroscience*, 9, 1134-1148.
- Lacquaniti F., Maioli C. (1989b). Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience*, 9, 149-159.
- Lallouche-Boiron L. & Audiffren M. (2008). Etude des processus de génération et d'inhibition des ajustements posturaux anticipés lors d'un paradigme stop. *Science & Motricité*, 64, 83-92.
- Lappin, J. S., & Eriksen, C. W. (1966). Use of a delayed signal to stop a visual reaction-time response. *Journal of Experimental Psychology*, 72(6), 805-811.
- LaRue J. (2004). L'approche cognitive du comportement moteur: le contrôle et l'apprentissage moteurs. In : *LaRue J. & Ripoll H. Manuel de Psychologie du Sport : les déterminants de la performance sportive*, 1, pp : 29-48. Paris, éditions revue EPS.
- LaRue J., Bard C., Teasdale N., Paillard J., Forget R. & Lamarre Y. (1995). Is proprioception important for the timing of motor activities? *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 73, 255-261.
- LaRue J. (2007). A new methodology providing evidence of two distinct processes in the production of hand/foot simultaneous responses. *Human Movement Science*, 26, 757-768.
- Lavender S.A., Marras W.S. & Miller R.A. (1993). The development of response strategies in preparation for sudden loading to the torso. *Spine*, 18, 2097-2105.
- Lee D.N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437-459.
- Lee W.A. (1980). Anticipatory control of postural and task muscles during rapid arm flexion. *Journal of Motor Behavior*, 12, 185-196.

- Lee W.A., Michaels C.F. & Pai Y.C. (1990). The organization of torque and EMG activity during bilateral handle pulls by standing humans. *Experimental Brain Research*, 82, 304-314.
- Lee W.A., Buchanan T.S. & Rogers M.W. (1987). Effects of arm acceleration and behavioral conditions of the organization of postural adjustments during arm flexion. *Experimental Brain Research*, 66, 257-270.
- Lestienne F. & Feldman A. (2001). Du schéma corporel au concept de configuration de référence : une approche théorique de la production du mouvement. *Evolutions psychomotrices*, 52, 59-75.
- Li X., Aruin A.S., (2007). The effect of short-term changes in the body mass on anticipatory postural adjustments. *Experimental Brain Research*, 181, 333-346.
- Li X., Aruin A.S., (2008). The effect of short-term changes in body mass distribution on feed-forward postural control. *Journal of Electromyography and Kinesiology* (in press).
- Logan G.D. & Burkell J. (1986). Dependence and independence in responding to double stimulation: a comparison of stop, change and dual-task paradigms. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 549-563.
- Logan G.D. & Cowan W.B. (1984). On the ability to inhibit thought and action: a theory of an act of control. *Psychological Review*, 91, 295-327.
- Logan G.D. (1981). Attention, automaticity, and the ability to stop a speeded choice response. In: Long J. & Baddeley A.D., *Attention and performance IX*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Logan G.D. (1982). On the ability to inhibit complex movements: a stop-signal study of typewriting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 778 - 792.
- Logan G.D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: a user's guide to the stop signal paradigm. In Dagenbach D. & Carr T.H., *Inhibitory processes in attention, memory, and language*. San Diego: Academic Press.
- Lund S. & Broberg C. (1983). Effects of different head positions on postural sway in man induced by reproducible vestibular error signal. *Acta physiologica Scandinavia*, 117, 307-309.
- Magnus R. (1924). Chapter 10. In: Van Harreveld A. (Eds), *Body Posture (Körperstellung)*, pp: 571-629.. Berlin: Springer Verlag.
- Marin L. & Danion F. (2005). *Neurosciences: Contrôle et apprentissage moteur*. Paris, Ellipses Edition Marketing S.A.
- Marinovic W., Plooy A. & Tresilian J.R. (2008). The time course of amplitude specification in brief interceptive actions. *Experimental Brain Research*, 188, 275-288.

- Massion J. & Viallet F. (1990). Posture, coordination, mouvement. *Rev Neurol (Paris)*, 146(10), 536-542.
- Massion J. (1984). Fonctions motrices. Encyclopédie Médico-chirurgicale. *Neurologie*, 17002D, 1-28.
- Massion J. (1997). *Cerveau et motricité, fonctions psychomotrices*. PUF, France.
- Massion J. (1992). Movement, posture and equilibrium: Interaction and coordination. *Progress in Neurobiology*, 38, 35-56.
- Massion J. (1998). Postural control systems in developmental perspective. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 22, 465-472.
- Massion J., Alexandrov A. & Frolov A. (2004). Why and how are posture and movement coordinated? *Progress in Brain Research*, 143, 13-27.
- Mattes S. & Ulrich R. (1997). Response force is sensitive to the temporal uncertainty of response stimuli. *Perception & Psychophysics*, 59, 1089-1097.
- McDonald P.V., van Emmerick R.E.A. & Newell K.M. (1989). The effects of practice on limb kinematics in a throwing task. *Journal of Motor Behavior*, 21, 245-264.
- Meijer O.J. & Roth K. (1988). *Advances in Psychology: Complex Movement Behavior 'The Motor-Action Controversy'*. North-Holland: Elsevier Sciences Publishers B.V.
- Middleton F.A. & Strick P.L. (2000). Basal ganglia and cerebellar loops: motor and cognitive circuits. Basal ganglia output and cognition: evidence from anatomical, behavioral, and clinical studies. *Brain Research. Brain Research Reviews*, 31, 236-250.
- Miller D., Galanter E. & Pribram K. (1960). *Plans and the structure of behaviour*. Austin TX, Holt, Rinehart & Winston.
- Mittelstaedt M. (1983). A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften*, 70, 272-281.
- Mochizuki G., Ivanova T.D. & Garland S.J. (2004). Postural muscle activity during bilateral and unilateral arm movements at different speeds. *Experimental Brain Research*, 155, 352-361.
- Moll L. & Kuypers H.G.J.M. (1977). Premotor cortical ablations in monkeys; contralateral changes in visually guided behaviour. *Science*, 198, 317-319.
- Morein-Zamir S., Nagelkerke P., Chua R., Franks I., & Kingstone A. (2004). Inhibiting prepared and ongoing responses: Is there more than one kind of stopping? *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 1034-1040.
- Mouchnino L., Aurenty R., Massion J. & Pedotti A. (1992). Coordination between equilibrium and head-trunk orientation during leg movement: a new strategy build up by training. *Journal of Neurophysiology*, 67, 1587-1598.

- Mouchnino L., Cincera M., Fabre J.C., Assaiante C., Amblard B., Pedotti A. & Massion J. (1996). Is the regulation of the center of mass maintained during leg movement under microgravity conditions? *Journal of Neurophysiology*, 76, 1212-1223.
- Naito E., Matsumura M. & Taguchi S. (1995). Movement-related potentials associated with motor inhibition during different types of stop signal paradigm in humans. *Journal of the Physiological Society of Japan*, 57, 59-67.
- Nardone A. & Schieppati M. (1988). Postural adjustments associated with voluntary contractions of leg muscles in standing man. *Experimental Brain Research*, 69, 469-480.
- Nashner L.M. (1976). Adapting reflexes controlling the human posture. *Experimental Brain Research*, 26, 59-72.
- Newell K.M. (1989). On task and theory specificity. *Journal of motor behaviour*, 21, 92-96.
- Nickerson R.S. & Burnham D.W. (1969). Response times with nonaging foreperiods. *Journal of Experimental Psychology*, 79, 452-457.
- Nougier V., Teasdale N., Bard C. & Fleury M. (1999). Modulation of anticipatory postural adjustments in a reactive and self-triggered mode in humans. *Neuroscience Letters*, 260, 109-112.
- Nouillot P., Bouisset S. & Do M.C. (1992). Do fast voluntary movements necessitate anticipatory postural adjustments even if equilibrium is unstable? *Neuroscience Letters*, 147, 1-4.
- Nouillot P., Do M.C. & Bouisset S. (2000). Are there anticipatory segmental adjustments associated with lower limb flexions when balance is poor in humans? *Neuroscience Letters*, 279, 77-80.
- Osman A. Kornblum S. & Meyer D.E. (1990). Does motor programming necessitate response execution? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 183-198.
- Osman A., Kornblum S. & Meyer D.E. (1986). The point of no return in choice reaction time: controlled and ballistic stages of response preparation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 243-258.
- Oudejans R.R., Michaels C.F., Bakker F.C. & Davids K. (1999). Shedding some light on catching in the dark: perceptual mechanisms for catching fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 531-542.
- Pachelia R.G. (1974). The interpretation of reaction time in information processing process research. In: Kantowitz B. (Eds.), *Human information processing: Tutorials in performance and cognition*, pp: 41 - 82. New York, Halstead Press.
- Paillard J. (1982). Apraxia and the neurophysiology of motor control. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series B*, 298, 111-134.

- Paillard J. (1985). Les niveaux sensori-moteur et cognitif du contrôle de l'action. In : *Laurent M. & Therme P. (Eds). Recherches en A.P.S. 1*, pp : 147- 163. Marseille : Publication du centre de recherche UEREPS.
- Paillard J. (1947). Quelques données physiologiques relatives au déclenchement de la commande motrice. *Année Psychologique*, 28-47.
- Paillard J. (1991). Knowing where and knowing how to get there. In: *Brain and space. J. Paillard (Eds)*, pp: 461-481. Oxford university press, Oxford.
- Paillard J. (1990). Réactif et prédictif : Deux modes de gestion de la motricité. In : *Nougier V. & Blanchi J.P. (Eds). Pratiques Sportives et Modélisation du Geste*, pp : 13-56. Grenoble.
- Paillard J. (1994). L'intégration sensori-motrice et idéomotrice. In : *Richelle M., Requin J. & Robert M. (Eds). Traité de Psychologie Expérimentale*, Chap.III.6. pp : 925-961. Paris, presses universitaire de France.
- Paillard J., Bard J. & Fleury M. (1989). Synchronizing hand and foot movement in a projective or reactive mode: two contrasting schedules of motor commands. *Society for Neuroscience, Abstract*, 243-3.
- Paulignan Y., Dufossé M., Hugon M. & Massion J. (1989). Acquisition of coordination between posture and movement in bimanual task. *Experimental Brain Research*, 77, 337-348.
- Penfield W. & Rasmussen T. (1950). The cerebral cortex of man: A Clinical Study of Localization of Function. Macmillan. New York.
- Pfefferbaum A., Ford J.M., Weller B.J. & Kopell B.S. (1985). ERPs to response production and inhibition. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 60, 423-444.
- Piaget J. (1967). *Biologie et Connaissance*, Paris, NRF, Gallimard.
- Pliszka S.R., Glahn D.C., Semrud-Clikeman M., Franklin C., Perez R., Xiong J. & Liotti M. (2006). Neuroimaging of inhibitory control areas in children with attention deficit hyperactivity disorder who were treatment naive or in long-term treatment. *American Journal of Psychiatry*, 163, 1052-1060.
- Posner M.I. & Boies S. (1971). Components of attention. *Psychological Review*, 78, 391-408.
- Posner M.I. (1978). *Chronometric explorations of mind*. Hillsdale, Laurence Erlbaum.
- Proteau L. & Dione L. (1982). Faire un choix entre deux directions et produire une seule et même réponse : est-ce une seule et même tâche. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 2, 19-59.
- Purves D., Augustine G.J., Fitzpatrick D., Hall W.C., Lamantia A.S., Mc Namara J.O. & Williams S.M. (2005). *Neurosciences*, 3^{ème} Edition. De Boeck & Larrien.

- Putnam C. (1993). Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: Descriptions and explanations. *Journal of Biomechanics*, 26, 125-135.
- Ramautar J.R., Kok A. & Ridderinkhof K.R. (2004). Effects of stop-signal probability in the stop-signal paradigm: the N2/P3 complex further validated. *Brain and Cognition*, 56, 234-252.
- Riccio G.E., Martin E.J. & Stoffregen T.A. (1992). The role of balance dynamics in the active perception of orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 624-644.
- Riehle A. & Requin J. (1989). Monkey primary motor and premotor cortex: single-cell activity related to prior information about direction and extent of an intended movement. *Journal of Neurophysiology*, 61, 534-549.
- Riehle A. (2005). Preparation for Action: One of the Key Functions of the Motor Cortex. In: *Riehle A. and Vaadia E. (Eds): Motor Cortex in Voluntary Movements: A Distributed System for Distributed Functions*, pp: 213-240. CRC Press, Boca Raton.
- Rizzolatti G., Luppino M. & Matteli M. (1998). The organization of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 106, 283-296.
- Rizzolatti G., Fadiga L., Gallese V. & Fogassi L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research and Cognitive Brain Research*, 3, 131-141.
- Robert G., Blouin J., Ruget H. & Mouchnino L. (2007). Coordination between postural and movement controls: Effect of changes in body mass distribution on postural and focal component characteristics. *Experimental Brain Research*, 181, 159-171.
- Roberts L.E., Rau H., Lutzenberger W. & Birbaumer N. (1994). Mapping P300 waves onto inhibition: Go/No-GO discrimination. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 92, 44-55.
- Roberts Jr.R.J., Hager L.D. & Heron C. (1994). Prefrontal cognitive processes: working memory and inhibition in the antisaccade task. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123, 374-393.
- Rogers M.W. & Pai Y.C. (1990). Dynamic transitions in stance support accompanying leg flexion movements in man. *Experimental Brain Research*, 81, 398-402.
- Roland P.E., Larsen B., Lassen N.A., Skinh J.E. (1980). Supplementary motor area and other cortical area in organisation of voluntary movement in man. *Journal of neurophysiology*, 43, 118-136.
- Roll J.P., Gillhodes J.C. & Tardy Gervel M.F. (1980). Effets perceptifs et moteurs des vibrations musculaires chez l'homme normal : mise en évidence des muscles antagonistes. *Archives italiennes de biologie*, 118, 51-71.
- Roll R., Velay J.L. & Roll J.P. (1991). Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities. *Experimental Brain Research*, 85, 423-431.

- Rolls E.T. & Williams G.V. (1987). Neural activity in the ventral striatum of the primate. In: *The Basal Ganglia. II. Structure and function – current concepts*, Carpenter MB, Jyamaran A (Eds), pp: 349-356. New-York, Plenum.
- Rolls E.T. & Williams G.V. (1987). Sensory and movement-related neuronal activity in different regions of the primate striatum. In *Schneider J.S. & Lidsky T.I. Basal ganglia and Behavior: Sensory Aspects of Motor Functioning*, pp: 37-59. Toronto, Hans Huber Publishers.
- Rossini P.M., Zarola F., Stalberg E. & Caramia M. (1988). Pre-movement facilitation of motor-evoked potentials in man during transcranial stimulation of the central motor pathways. *Brain Research*, 458, 20-30.
- Rubia K., Smith A.B., Brammer M.J. & Taylor E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *Neuroimage*, 20, 351-358.
- Rush B.K., Barch D.M. & Braver T.S. (2006). Accounting for cognitive aging: context processing, inhibition or processing speed? *Neuropsychology, development, and cognition. Section B, Aging, neuropsychology and cognition*, 13, 588-610.
- Sanders A.F. (1990). Issues and trends in the debate on discrete vs. Continuous processing of information. *Acta Psychologica*, 74, 123-167.
- Sasaki K., Gemba H. & Tsujimoto T. (1989). Suppression of visually initiated hand movement by stimulation of the prefrontal cortex in the monkey. *Brain Research*, 495, 100-107.
- Sasaki K., Gemba H., Nambu A. & Matsuzaki R. (1993). No-go activity in the frontal association cortex of human subjects. *Neuroscience Research*, 18, 249-252.
- Sasaki K., Tsujimoto T., Matsuzaki R., Kyuhou S. & Gemba H. (1996). Studies on integrative functions of the human frontal association cortex with MEG. *Cognitive Brain Research*, 5, 165-174.
- Sasaki K. & Gemba H. (1986). Electrical activity in the prefrontal cortex specific to no-go reaction of conditioned hand movement with colour discrimination in the monkey. *Experimental Brain Research*, 64, 603-606.
- Sasaki K., Gemba H. & Tsujimoto T. (1989). Suppression of visually initiated hand movement by stimulation of the prefrontal cortex in the monkey. *Brain Research*, 495, 100-107.
- Sasaki K., Gemba H., Nambu A. & Matsuzaki R. (1993). No-go activity in the frontal association cortex of human subjects. *Neuroscience Research*, 18, 249-252.
- Schachar R. & Logan G.D. (1990). Impulsivity and inhibitory control in normal development and childhood psychopathology. *Developmental Psychology*, 26, 710-720.

- Schepens B. & Drew T. (2004). Independent and convergent signals from the pontomedullary reticular formation contribute to the control of posture and movement during reaching in the cat. *Journal of Neurophysiology*, 92, 2217-2238.
- Schmid R.A. & Russel D.G. (1972). Movement velocity and movement time as determiners of degree of preprogramming in simple movements. *Journal of Experimental Psychology*, 96, 315-320.
- Schmidt R.A. & Lee T.D. (1999). *Motor control and learning: a behavioral emphasis*, Champaign, IL, Human Kinetics, 3rd Edition.
- Schmidt R.A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Schmidt R.A. (1983). On the underlying structure of well-learned motor responses: A discussion of Namikas, and Schneider & Fisk. In: *Magill R.A. (Eds.), Memory and control of action*, pp. 145-165. Amsterdam: North Holland.
- Schmidt R.A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Shea C.H. & Northam C.C. (1982). Discrimination of visual linear velocities. *Research Quarterly For Exercise and Sport*, 53, 222-225.
- Shea C.H., Krampitz J.B., Tolson H., Ashby A.A., Howard R.M. & Husak W.S. (1981). Stimulus velocity, duration and uncertainty as determiners of response structure and timing accuracy. *Research Quarterly*, 52, 86-99.
- Shea C.H. (1980). Effects of extended practice and movement time on motor of a coincidence timing task. *Research Quarterly*, 51, 369-381.
- Sherrington (1906). *The integrative action of the nervous system*. New Haven. Yale University Press.
- Shibasaki H. & Hallett M. (2006). What is the Bereitschaftspotential? *Clinical Neurophysiology*, 117, 2341-2356.
- Shiratori T. & Latash M.L. (2000). The roles of proximal and distal muscles in anticipatory postural adjustments under asymmetrical perturbations and during standing on rollerskates. *Clinical Neurophysiology*, 111, 613-623.
- Shiratori T. & Latash M.L. (2001). Anticipatory postural adjustments during load catching in standing subjects. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1250-1265.
- Shiratori T. & Aruin A.S. (2007). Modulation of anticipatory postural adjustments associated with unloading perturbation: effect of characteristics of a motor action. *Experimental Brain Research*, 178, 206-215.
- Shiratori T. & Latash M.L. (2001). Anticipatory postural adjustments during load catching by standing subjects. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1250- 1265.

- Slater Hammel A.T. (1960). Reliability, Accuracy, and refractoriness of a transit reaction. *Research Quarterly*, 31, 217-228.
- Slijper H. & Latash M.L. (2000). The effects of instability and additional hand support on anticipatory postural adjustments in leg, trunk and arm muscles during standing. *Experimental Brain Research*, 135: 81-93.
- Slijper H., Latash M.L. & Mordkoff T.J. (2002). Anticipatory postural adjustments under simple and choice reaction time conditions. *Brain Research*, 924, 184-197.
- Sternberg S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donder's method. *Acta Psychologica*, 30. Attention and performance II, 276-315.
- Struppler A., Gerilovsky L. & Jakob C. (1993). Self-generated rapid taps directed to the opposite forearm in man : anticipatory reduction in the muscle activity of the target arm. *Neuroscience Letters*, 159, 115-118.
- Temprado J.J. (1994). Méthodes de chronométrie mentale et modèles de traitement de l'information. *Science & motricité*, 22, 23-33.
- Thomas A. (1940). *Equilibre et équilibration*. Masson, Paris.
- Thut G., Hauert C.A., Viviani P., Morand S., Spinelli L., Blanke O., Landis T. & Michel C. (2000). Internally driven vs. externally cued movement selection: a study on the timing of brain activity. *Cognitive Brain Research*, 9, 261-269.
- Tomberg C. & Caramia M.D. (1991). Prime mover muscle in finger lift or finger flexion reaction times: identification with transcranial magnetic stimulation. *Electroencephalography & clinical Neurophysiology*, 81, 319-322.
- Toussaint H.M., Commissaris D.A., Hoozemans M.J., Ober M.J. & Beek P.J. (1997). Anticipatory postural adjustments before load pickup in a bi-manual whole body lifting task. *Medicine & Science in Sports & Exercice*, 29, 1208-1215.
- Tresilian J.R. & Plooy A. (2006). Systematic changes in the duration and precision of interception in response to variation of amplitude and effector size. *Experimental Brain Research*, 171, 421-435.
- Tresilian J.R. (1995). Perceptual and cognitive processes in time-to-contact estimation: analysis of prediction motion and relative judgment tasks. *Perception & Psychophysics*, 57, 231-245.
- Tresilian J.R. (1999). Visually timed action: time-out for 'tau'? *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 301-310.
- Tresilian J.R. (2005). Hitting a moving target: perception and action in the timing of rapid interceptions. *Perception & Psychophysics*, 67, 129-149.

- van den Wildenberg W.P.M & van der Molen M.W. (2004). Developmental trends in simple and selective inhibition of compatible and incompatible responses. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 201-220.
- van den Wildenberg W.P.M., van Boxtel G.J., van der Molen M.W., Bosch D.A., Speelman J.D. & Brunia C.H. (2006). Stimulation of the subthalamic region facilitates the selection and inhibition of motor responses in Parkinson's disease. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 626-636.
- Verbruggen F. & Logan G.D. (2008). Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends in cognitive sciences* (article in press).
- Vince M.A. (1948). The intermittency of control movements and the psychological refractory period. *British Journal of Psychology*, 38, 149-157.
- Viviani P. & Terzuolo C. (1980). Space time invariance in learned motor skills. In: *Stelmach G.E. & Requin J. (Eds.), Tutorials in motor behavior*. Amsterdam. North-Holland Publishing Company.
- Wann J.P. (1996). Anticipating arrival: is the 'tau' margin a specious theory? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 1031-1048.
- Watanabe J., Sugiura M., Sato K., Sato Y., Maeda Y., Matsue Y., Fukuda H. & Kawashima R. (2002). The human prefrontal and parietal association cortices are involved in NO-GO performances: An Event-Related fMRI Study. *NeuroImage*, 17, 1207-1216.
- Wichmann F.A. & Hill N.J. (2001). The psychometric function: 1 .Fitting, Sampling, and Goodness of fit. *Perception and Psychophysics*, 63, 1293-1313.
- Wickelgren W.A. (1977). Speed-accuracy tradeoff and information processing dynamics. *Acta Psychologica*, 41, 67-85.
- Wiese H., Stude P., Nebel K., De Greiff A., Forsting M., Diener H.C., & Keidel M. (2004). Movement preparation in self-initiated versus externally triggered movements: an event-related fMRI-study. *Neuroscience Letters*, 371, 220-225.
- Yiou Y., Hamaoui A. & Le Bozec S. (2007). Influence of base of support size on arm pointing performance and associated anticipatory postural adjustments. *Neuroscience Letters*, 423, 29-34.
- Zattara M. & Bouisset S. (1983). Influence de la vitesse d'exécution du mouvement volontaire sur les accélérations locales anticipatrices. In: *Résumé des communications, 8ème Congrès de la Société de Biomécanique*, pp: 113-114. Lyon.

Nabil ILMANE

Effets de la contrainte temporelle sur la coordination Posture/Mouvement : particularité d'une situation d'anticipation-coïncidence

Résumé :

Les mouvements volontaires sont accompagnés par des ajustements posturaux anticipateurs (APAs). Leur rôle consiste à prévenir et à compenser de possibles perturbations du corps provoquées par l'exécution du mouvement. Des études antérieures ont montré que la coordination posture / mouvement est modifiée selon que le mouvement est exécuté le plus rapidement possible en réponse à un signal externe (réactif : TRS), ou que le mouvement est auto-initié (prédictif : AI). L'objectif de ce travail est d'examiner le mode de coordination posture / mouvement impliqué dans une situation d'anticipation-coïncidence (AC) lors de l'exécution de mouvements simples et complexes, et ensuite, comparer ce mode aux modes TRS et AI.

Trois études expérimentales ont été menées pour vérifier si : (1) les modes de coordination, obtenus sur des gestes simples, s'étendent à des mouvements complexes ; (2) le mode de coordination en AC dépend des caractéristiques temporelles du mobile utilisé dans la tâche ; (3) les commandes impliquant les APAs et le mouvement focal sont associées ou dissociées en fonctions des contraintes temporelles TRS et AC. Ainsi, nous avons démontré que : (1) les stratégies de coordination posture / mouvement s'appliquent sur les mouvements complexes ; (2) la prédictibilité du moment de déclenchement dans la condition AC rapproche celle-ci de la situation AI ; (3) les différences de coordination entre les conditions réactive (TRS) et prédictives (AC, AI) sont liées à des différences dans les mécanismes de préparation consistant à dissocier les commandes posturales et focales en situation prédictive et à associer ces commandes dans la situation réactive. Les implications théoriques qui émergent de ces résultats sont discutées.

Mots-clés : Coordination Posture/Mouvement, APAs, contrainte temporelle, anticipation-coïncidence

Effects of the temporal constraint on the coordination Posture/Movement: specificity of the anticipation-coincidence situation

Abstract:

Voluntary movements are generally accompanied by anticipatory postural adjustments (APAs). They are centrally generated as a feedforward mechanism to counteract the mechanical effects of predicted balance perturbations. Previous studies showed that the coordination between posture and movement is modified depending on whether the movement is performed in a reactive temporal pressure (TRS) or in a self-initiated (AI) manner. The aim of this thesis is to examine the coordination of posture and movement in anticipation-coincidence (AC) timing tasks in simple and complex movements, and then to compare this mode to the TRS and AI modes.

Three experiments were achieved to verify : (1) whether simple movement coordination modes can be extended to complex movements ; (2) whether the temporal characteristics of the mobile used in the task modifies the coordination in AC condition ; (3) to which extent the motor commands of APAs and the focal movement are coupled in response to the TRS and AC temporal pressures. Results show that: (1) the different strategies of coordination between posture and movement are extended to the complex tasks; (2) the predictable timing of movement execution in the AC condition generates behaviours closer to those observed in AI condition; (3) the differences in the coordination between the reactive (TRS) and the predictive (AC, AI) conditions are related to the difference in the preparatory processes which consists on the dissociation of postural and focal commands in the predictive situations, and the association of this motor commands in the reactive situation. Theoretical implications emerging from these results are discussed.

Keywords : Coordination Posture/Mouvement, APAs, temporal constraint, anticipation-coincidence

Laboratoire Activité Motrice et Adaptation PsychoPhysiologique

UFR STAPS, Allée du château – BP 6237, 45062 Orléans CEDEX 2.