



HAL
open science

**ÉTUDE DES PROCESSUS PRÉPARATOIRES
IMPLIQUÉS DANS L'COORDINATION
POSTURE/MOUVEMENTE** Effets de la période
préparatoire sur les ajustements posturaux anticipés

Rémy Cuisinier

► **To cite this version:**

Rémy Cuisinier. ÉTUDE DES PROCESSUS PRÉPARATOIRES IMPLIQUÉS DANS L'COORDINATION POSTURE/MOUVEMENTE Effets de la période préparatoire sur les ajustements posturaux anticipés. Neurosciences [q-bio.NC]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006. Français. NNT : . tel-00152427

HAL Id: tel-00152427

<https://theses.hal.science/tel-00152427>

Submitted on 6 Jun 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER

Discipline : Mouvement, Performance, Santé

Présentée et soutenue publiquement par

Rémy CUISINIER

Le 11 Décembre 2006

**ÉTUDE DES PROCESSUS PRÉPARATOIRES IMPLIQUÉS DANS LA
COORDINATION POSTURE/MOUVEMENT**

Effets de la période préparatoire sur les ajustements posturaux anticipés

Soutenue devant le jury composé de

Assaïante C.	CR, CNRS Université de la Méditerranée, Marseille.	Rapporteur
Bleuse S.	Dr, Centre Hospitalier Universitaire, Lille	Examineur
Mouchnino L.	HDR, Université de la Méditerranée, Marseille.	Examineur
Nougier V.	Pr., Université Joseph Fourier, Grenoble.	Directeur de thèse
Olivier I.	HDR, Université Joseph Fourier, Grenoble.	Directeur de thèse
Papaxanthis C.	Pr., Université de Bourgogne, Dijon.	Rapporteur

Avant-propos

Avant de vous plonger dans une lecture fastidieuse, je tiens à remercier celles et ceux qui, sur le plan scientifique, affectif et relationnel m'ont accompagné, tout au long de ce projet.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Sport et Performance Motrice à la Faculté des Sciences du Sport de Grenoble. Je salue ses membres qui m'ont cordialement accueilli autour de discussions scientifiques ou dînatoires.

Je remercie respectueusement tous les membres du jury d'avoir accepté de juger et de critiquer ce travail pour m'orienter vers de futurs efforts à faire.

Je tiens particulièrement à remercier Isabelle Olivier et Vincent Nougier pour la confiance ils m'ont accordé en me faisant l'honneur de suivre mon travail durant l'année de DEA et de ces trois années de thèse. Je leur suis reconnaissant de m'avoir initié aux joies de la recherche et permis de porter jusqu'au bout ce travail. Je suis conscient que cela n'était pas chose facile que d'essayer de lire entre les lignes pour deviner à certains moments où je voulais en venir. J'admire cette rigueur de travail et cette capacité de synthèse qui vous caractérisent et qui parfois m'ont fait défaut. Je tacherai de m'en inspirer.

Je remercie tous les sujets qui ont accepté de participer à ces expériences. Sans ces acteurs anonymes de la recherche, aucune ligne de ce travail n'aurait pu être écrite. Que tous soient assurés de mes sincères remerciements.

Je remercie mes amis et anciens compagnons de lycée, doctorant et anciens doctorants des laboratoires SPM et SENS, pour les agréables moments de détente qui m'ont tant manqués durant des six derniers mois. Je ne peux citer ici toutes les personnes qui ont compté durant ces quelques années tant elles sont nombreuses, je tiens à leur dire un grand merci à tous. Il n'est pas coutume pour un chercheur de négliger ses erreurs, je compte bien rattraper ces moments perdus avec vous le plus tôt possible autour d'une bonne bière...

Enfin et surtout, je souhaiterais rendre hommage à ma famille, mes parents et mon frère, qui ont dû subir mes doutes et mes inquiétudes, et qui, malgré tout, m'ont toujours encouragé. Je voudrais leur témoigner mon affection et leur dire à quel point leur soutien a été plus qu'indispensable...

« Les savants sont optimistes parce que leur passion leur donne des joies fréquentes en leur épargnant les chagrins ; ils ne se désespèrent pas de ne jamais trouver la vérité et ils s'en consolent aisément puisqu'ils ne sont jamais privés du plaisir de la recherche. »

Henri Poincaré (1854-1912)

TABLE DES MATIÈRES

PRÉAMBULE	1
CHAPITRE I: CONTROLE MOTEUR ET PRÉPARATION MOTRICE	4
1. NEURO ANATOMIE DU CONTROLE MOTEUR	4
1.1. Voies centrales du contrôle du mouvement volontaire	5
1.2. Séquence d'activation des aires corticales	7
2. MODE DE CONTROLE DU MOUVEMENT	9
3. PROGRAMME MOTEUR	11
4. CHRONOMETRIE MENTALE	13
4.1. Principe	13
4.2. Procédure de Temps de Réaction Simple (TRS)	15
4.3. Procédure de Temps de Réaction de Choix (TRC)	16
4.3.1. Méthodes chronométriques	17
4.3.2. Stades de traitement affectés par la durée de la PP	19
4.4. Préparation motrice	22
4.4.1. Préparation Neutre vs. Sélective	24
4.4.2. Effets de la Période Préparatoire (PP)	24
4.4.2.1. Stratégie d'estimation du moment d'apparition du SI	26
4.4.2.2. Présence d'un optimum de préparation	26
4.4.2.3. Extraction d'une information de la durée de la PP	27
4.5. Effet du vieillissement sur le système de traitement de l'information	28
4.5.1. Préparation de la réponse	28
4.5.2. Programmation de la réponse	29
CHAPITRE II: POSTURE-ÉQUILIBRE-MOUVEMENT	31
1. VOIES CENTRALES DU CONTROLE DE LA POSTURE	31
2. DEFINITION DE LA POSTURE	33
2.1. Fonctions du contrôle postural	34
2.2. Fonctionnement du contrôle postural	35
2.3. Posture et coût attentionnel	38
3. COORDINATION POSTURE-MOUVEMENT	39
3.1. Ajustements posturaux	40
4. CAS PARTICULIER : APAS	42
4.1. Fonctions des APAs	42
4.1.1. Compensation des perturbations dues au mouvement	43
4.1.1.1. Compensation des déplacements du CG	43
4.1.1.2. Compensation des forces internes	45
4.1.2. Modification des conditions d'appui	46
4.1.3. Optimisation du mouvement	47
4.2. Propriétés des APAs	48
4.3. Mode de coordination entre posture et mouvement	50
4.4. Impacts du mode de déclenchement du mouvement sur les APAs	52
4.4.1. APAs et contrainte temporelle (TRS)	53
4.4.2. APAs et incertitude événementielle (TRC)	54
4.5. Effets du vieillissement sur la coordination posture/mouvement	56
QUESTIONS ET OBJECTIFS	57
CHAPITRE III: ÉVOLUTION DE L'OPTIMUM DE PRÉPARATION EN FONCTION DE LA CONDITION POSTURALE	62
1. INTRODUCTION	62
2. METHODE	63
2.1. Sujets	63
2.2. Matériel	63
2.3. Procédure et conditions expérimentales	65
2.4. Analyses des Données	65
2.4.1. Analyse électromyographique	65
2.4.2. Analyse cinématique	66
2.4.3. Analyse du déplacement du centre des pressions	66

2.5. Analyse statistique.....	67
3. RESULTATS	68
3.1. Respect des consignes	68
3.2. Effets de la condition posturale et de la PP sur le temps prémoteur.....	68
3.3. Activité électromyographique dans la condition debout.....	69
3.4. Déplacement du CP dans la condition debout.....	70
4. DISCUSSION.....	73
4.1. Impact de la période préparatoire sur le temps prémoteur.....	73
4.2. Modification temporelle des APAs en situation debout.....	75
4.3. Interaction posture/mouvement en fonction de la PP.....	75
4.4. Mécanismes centraux de la commande des ajustements posturaux	76
CHAPITRE IV: AUGMENTATION DE LA PÉRIODE PRÉPARATOIRE OPTIMALE EN FONCTION DE LA COMPLEXITE POSTURALE LORS D'UNE PRÉPARATION NEUTRE.	78
1. INTRODUCTION.....	78
2. METHODE.....	79
2.1. Sujets	79
2.2. Matériel.....	79
2.3. Procédure et conditions expérimentales	80
2.4. Analyses des Données	81
2.4.1. Analyse électromyographique.....	81
2.4.2. Analyse du mouvement.....	82
2.4.3. Analyse des données issues de la plate-forme de force	82
2.5. Analyse statistique.....	83
3. RESULTATS	84
3.1. Respect des consignes	84
3.2. Différence posturale Assis vs. Debout	84
3.2.1. Effets de la condition posturale sur le pattern général des APAs	84
3.2.2. Condition posturale et stabilité	86
3.3. Effets de la PP sur le temps prémoteur.....	87
3.4. Effets de la PP sur les APAs en condition Debout.....	88
3.4.1. Données électromyographiques	88
3.4.2. Données de la plate-forme de force	89
4. DISCUSSION.....	90
4.1. Complexité liée à la posture Assis vs. Debout	90
4.2. Optimum de préparation et nature de la préparation.....	91
4.3. Stratégie posturale debout en fonction de la nature de la préparation.....	93
CHAPITRE V: EFFET D'UNE INFORMATION PRÉALABLE SUR LA PRÉPARATION POSTURALE	95
1. INTRODUCTION.....	95
2. METHODE.....	97
2.1. Sujets	97
2.2. Matériel.....	97
2.3. Procédure et conditions expérimentales	98
2.4. Analyses des Données	100
2.4.1. Analyse du mouvement.....	100
2.4.2. Analyse électromyographique.....	100
2.4.3. Analyse du déplacement du CP	101
2.5. Analyse statistique.....	101
3. RESULTATS	101
3.1. Effets de la perturbation posturale et de la condition de préparation	101
3.1.1. Centre des pressions et accélération du bras	101
3.1.2. Données électromyographiques	105
3.1.3. Activité posturale lors du Non Délestage	108
3.1.4. Temps de réaction	109
3.2. Effets de la période préparatoire aléatoire lors du délestage	110
3.2.1. Stabilité posturale et Accélération des bras	110
3.2.2. Données électromyographiques en fonction de la PP.....	112
3.2.3. Temps de réaction	113
4. DISCUSSION.....	114

4.1. Effets de la nature de la préparation lors du délestage.....	114
4.2. Préparation posturale lors du non délestage.....	116
4.3. Préparation motrice et posturale.....	116
4.4. Réponse posturale et focale en fonction de la PP.....	117
CHAPITRE VI: EFFET DE L'AGE ET D'UNE REPROGRAMMATION DU MOUVEMENT FOCAL SUR LES APAS.....	121
1. INTRODUCTION.....	121
2. METHODE.....	122
2.1. Sujets.....	122
2.2. Matériel.....	122
2.3. Procédure et conditions expérimentales.....	124
2.4. Analyses des Données.....	126
2.4.1. Analyse électromyographique.....	126
2.4.2. Analyse du mouvement.....	126
2.4.3. Analyse du déplacement du centre des pressions.....	126
2.5. Analyse du moment vertical T_z	127
2.6. Analyse statistique.....	128
3. RESULTATS.....	128
3.1. Effets de l'âge et de la durée de la PP sur la coordination entre la posture et le mouvement.....	128
3.1.1. Temps de réaction.....	128
3.1.2. Accélération du Bras.....	130
3.1.3. APAs et stabilité posturale.....	131
3.1.3.1. Données électromyographiques.....	131
3.1.3.2. Déplacement du CP.....	131
3.1.3.3. Moment vertical.....	133
4. DISCUSSION.....	135
4.1. Effets de l'âge et de la PP lors de la préparation Valide.....	136
4.1.1. Evolution du TR en fonction de la condition posturale.....	137
4.2. Préparation posture/mouvement et reprogrammation du mouvement.....	138
CHAPITRE VII: DISCUSSION GÉNÉRALE.....	141
1. OPTIMUM DE PREPARATION, CONTRAINTE POSTURALE ET INCERTITUDE.....	143
1.1. Contrainte posturale liée à l'exécution du mouvement.....	143
1.2. Optimum de préparation et contrainte posturale.....	144
1.3. Optimum de préparation et incertitude de la tâche.....	145
1.3.1. Incertitude temporelle.....	145
1.3.2. Incertitude événementielle.....	146
1.3.3. Effet de l'âge.....	147
2. PREPARATION D'UNE TACHE POSTURO-CINETIQUE ET APAS.....	148
3. INTERPRETATION DE LA COORDINATION POSTURE/MOUVEMENT EN FONCTION DE L'INCERTITUDE EVENEMENTIELLE ET TEMPORELLE DE LA PREPARATION.....	149
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	155
BIBLIOGRAPHIE.....	157
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	177

PRÉAMBULE

La thématique générale du travail présentée dans ce document s'inscrit dans le cadre de l'étude des processus préparatoires impliqués dans la coordination qui existe entre la posture, l'équilibre et le mouvement. Nous avons étudié les effets d'une contrainte temporelle et événementielle sur la préparation d'une tâche motrice impliquant une perturbation posturale. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la manipulation de la période préparatoire dans sa durée, sa nature ainsi que son mode de présentation impliquée dans le déclenchement et le calibrage des ajustements posturaux anticipés (APAs).

Il nous paraît important de situer en préambule quelques notions qui vont jalonner notre démarche, orienter les choix méthodologiques et introduire les hypothèses.

On considère généralement que pour organiser et contrôler son action, le Système Nerveux Central (SNC) dispose de deux modes de contrôle. Le premier consiste à réagir aux modifications du monde extérieur ou du système musculo-squelettique. Ce mode, qualifié de réactif est tributaire du temps. En effet, le système ne pourra réagir qu'après avoir été informé de cette modification par les conséquences sensorielles qu'elle occasionne. Ainsi, le temps mis par ces informations pour parvenir au SNC correspond au moins au temps nécessaire pour que l'information sensorielle puisse être utilisée de façon rétroactive. Il existe donc un délai temporel entre le moment de la modification de l'environnement et la réaction du système face à cette modification. Dans certains cas, par exemple lorsque vous prenez votre café posé sur le plateau du serveur, des effets mécaniques agissent pendant le délai temporel entre la modification de la répartition du poids du plateau et la correction motrice du garçon de café. Ces effets mécaniques finiront inévitablement par rendre instable le plateau et créer un incident regrettable. Pour palier à ce problème, le système dispose d'un deuxième mode de contrôle de l'action qui consiste à prédire les modifications à venir de l'environnement pour les anticiper. Reprenons l'exemple du garçon de café. Lorsque celui-ci vous sert, il a la possibilité de prédire le moment et d'estimer le poids délesté de l'avant bras porteur du plateau. Il peut donc gérer et contrôler l'équilibre du plateau en prévision des conséquences de son action, évitant ainsi toute perturbation du système.

Ce mode, qualifié de proactif, permet au SNC de déclencher une commande motrice avant que les modifications auxquelles cette action répond n'aient eu lieu. En ce sens, « *le cerveau sert à prédire le futur, à anticiper les conséquence de l'action (la sienne ou celle des*

autres), à gagner du temps. (...) Le cerveau n'est pas qu'une machine réactive, c'est une machine proactive qui projette sur le monde ses interrogations. » (Berthoz, 1997).

Cette capacité du cerveau est aujourd'hui largement admise et une grande partie des recherches actuelles tente de comprendre comment cette anticipation peut se mettre en place. Pour anticiper sur les événements à venir, le SNC peut mettre en place une séquence motrice déterminée, fixe et non modifiable. Cependant, cette séquence motrice préprogrammée est dépendante de l'état de préparation du système. Ainsi, en fonction du moment d'apparition des informations, le SNC serait capable de réagir plus rapidement grâce au processus de préparation réalisé en amont des processus de traitement de l'information. Ces processus de préparation peuvent se baser sur une incertitude temporelle (le quand) et/ou une incertitude événementielle (le quoi ?) liée à la réponse à produire. Par exemple, lorsque nous demandons au sujet de presser sur un bouton en fonction d'un événement précis qui risque de se produire dans 80% des cas, le SNC peut réagir de manière plus rapide, avec un temps de réaction (TR) inférieur à une situation où ce même événement risque de se produire dans 20% des cas seulement. Concernant l'incertitude temporelle, Le SNC peut réagir plus rapidement lorsqu'il dispose de 500 ms de préparation plutôt que 5 s (temps séparant un signal préparatoire d'un signal impératif). Ces mouvements a priori « simples » posent pourtant des problèmes de planification et de préparation importants au SNC.

A fortiori, l'étude de mouvements plus « complexes » faisant intervenir d'autres articulations semble intéressante pour l'étude de ces processus. Quand on réalise un mouvement en posture érigée, on amène une complexité supplémentaire puisque le système doit contrôler un plus grand nombre de degrés de libertés pour permettre le déplacement du segment corporel orienté vers un but de manière efficiente et parallèlement maintenir un équilibre postural stable. Réciproquement, le SNC doit aussi contrer les forces de réactions générées par le mouvement. Ainsi, l'activité motrice intentionnelle est donc confrontée à deux exigences apparemment contradictoires qui sont d'une part, le mouvement de certains segments corporels orientés vers un but et d'autres part, la stabilisation des autres segments du corps afin de maintenir l'équilibre et une posture adéquate pour la réalisation de la tâche. Ces deux exigences renvoient à deux systèmes de contrôle différents, l'un relatif au contrôle du mouvement, l'autre à celui de la posture. Le SNC est donc dans la nécessité de coordonner le contrôle postural et le contrôle moteur afin d'assurer leur efficacité conjuguée. L'existence des ajustements posturaux a été proposée comme un moyen dont disposait le SNC afin de

remplir ce rôle de coordination. Les contraintes relatives à cette coordination entre la posture et le mouvement sont exacerbées si le mouvement est réalisé à vitesse maximale ou avec une inertie importante. Il est alors généralement admis que des Ajustements Posturaux Anticipés (APAs) permettent de contrer ces forces de réaction associées à des mouvements d'élévation du bras à partir d'une estimation prédictive des effets du mouvement réalisé (Bouisset et Zattara, 1981; Hugon et al., 1982). Cependant, cette capacité de minimisation de la perturbation posturale semble être influencé par les conditions de réalisation de la tâche, à savoir, une tâche de temps de réaction simple (TRS) et une tâche de temps de réaction de choix (TRC). Il convient donc de comprendre comment le SNC coordonne la posture et le mouvement au regard des processus situés en amont de la chaîne de traitement de l'information. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la période préparatoire et à l'effet de sa durée sur le processus de préparation motrice permettant d'optimiser un comportement moteur.

Dans un premier chapitre, nous nous proposons de situer notre travail parmi les données de la littérature illustrant ces phénomènes de préparation pour une réponse motrice simple. Ensuite, nous verrons comment le SNC coordonne la posture et le mouvement lorsque ce dernier entraîne une perturbation posturale.

Les chapitres suivants seront consacrés à la présentation de différentes questions qui ont jalonné le cours de ce travail ainsi qu'aux résultats obtenus. Ces résultats seront discutés partiellement dans chaque chapitre au regard de la littérature centrée sur les questions initiales.

Dans un dernier chapitre, nous discuterons l'ensemble des résultats obtenus au regard de leurs intérêts dans la compréhension des mécanismes de préparation de la coordination entre la posture et le mouvement.

CHAPITRE I: CONTROLE MOTEUR ET PRÉPARATION MOTRICE

Les modèles cognitifs du contrôle du mouvement proviennent de l'évolution et de la convergence de plusieurs disciplines traditionnelles telles que la psychologie expérimentale, l'intelligence artificielle, la linguistique et les neurosciences. Ces modélisations cognitives se sont appuyées sur l'étude des structures et des processus, conscients et inconscients, qui permettent d'élaborer des « représentations symboliques » du monde extérieur. Le concept de représentation mentale, élaboré par la psychologie cognitive dès le milieu du 20^{ième} siècle, suggère qu'entre les stimulations de l'environnement et les comportements observés sont intercalés des processus de traitement qui vont transformer les informations d'entrée en état « représentationnels » influençant les réponses motrices. Le cadre conceptuel suggéré par cette analogie correspond à une approche dite du traitement de l'information. L'apparition de ce type d'approche dans le domaine de la psychologie cognitive répondait à la nécessité de découvrir et d'expliquer le fonctionnement des opérations mentales humaines. Ce premier chapitre met en évidence ce fonctionnement au travers des informations issues, d'une part, de la neuro-anatomie du contrôle moteur, et d'autres parts, de la modélisation du contrôle moteur afin de mettre en exergue les phénomènes de préparation associés à la production d'une réponse motrice. Nous verrons tout d'abord comment la modélisation du contrôle moteur s'est élaborée. Nous nous centrerons ensuite sur les tenants et les aboutissants de ce contrôle moteur notamment au travers de sa capacité de préprogrammation. Enfin, nous nous intéresserons plus particulièrement à une variable appelée la période préparatoire susceptible d'améliorer le processus de préparation du mouvement et d'étudier ses effets sur le processus de traitement de l'information.

1. NEURO ANATOMIE DU CONTROLE MOTEUR

Bien que l'étude des voies centrales associées au contrôle moteur n'ait pas de lien direct avec le travail que nous avons engagé, il nous paraît important d'aborder ces aspects permettant de mieux comprendre les tenants et les aboutissants de la modélisation du contrôle moteur au niveau des sciences cognitives. Cette partie restera cependant très générale.

1.1. Voies centrales du contrôle du mouvement volontaire

On peut attribuer à Sherrington, un des pères des neurosciences, d'avoir évoqué le concept de représentation central du cerveau. Ce concept est directement issue de la relation entre la localisation d'une zone cérébrale et sa fonction précise. Sans remonter à Gall et sa phrénologie, Fritsch et Hitzig (1870) avaient montré que la stimulation électrique de certaines parties du cortex d'un canidé produisait des contractions musculaires. Reprenant cette méthodologie sur le cortex d'un chimpanzé anesthésié, Sherrington, dans son dernier article en 1917, réussit à déterminer la relation entre la localisation de la stimulation corticale et la réponse motrice produite. Ainsi, une carte motrice a été constitué et reproduit à petite échelle l'anatomie du corps humain. Mais il faut attendre les travaux de Penfield et Rasmussen (1950) pour que la notion de représentation soit étendue aux fonctions sensorielles. Cette « cartographie » met en évidence de nombreux points communs entre les fonctions motrices et les mécanismes sensoriels, et en particulier les sensations tactiles. En effet, l'aire motrice corticale (aire 4 ou cortex moteur primaire) située dans la partie postérieure du lobe frontal se retrouve juste à côté de l'aire somatosensorielle localisée, elle, dans la partie la plus antérieure du lobe pariétal. Les deux régions allongées sont donc face à face et les fibres nerveuses qui y partent ou y arrivent ont une même organisation somatotopique. Tant pour le cortex moteur que pour le cortex somatosensoriel, l'image du corps que l'on peut « lire » sur le cortex est déformée. Cette déformation est fonction de la précision avec laquelle est contrôlée la partie du corps en question, et par le degré de sa sensibilité (cf. figure I-1, page 6). Les travaux modernes ont confirmé ici son organisation modulaire en colonnes verticales d'environ 300 microns de diamètre. Ce cortex moteur primaire reste en principe la structure de médiation principale des commandes motrices par les voies cortico-spinales (pyramidales) descendantes.

Plusieurs structures cérébrales sont regroupées sous l'appellation de ganglions de la base, soit le noyau caudé, le putamen, le globus pallidus et le noyau sous-thalamique. Les ganglions de la base sont impliqués dans une boucle complexe qui les lie aux différentes aires corticales. L'information en provenance des aires frontales, préfrontales et pariétales du cortex traverse les ganglions de la base et retournent à l'aire motrice supplémentaire via le thalamus. Cette boucle fonctionne comme une rétroaction susceptible de focaliser des informations issues de larges régions corticales sur l'AMS. On peut alors imaginer que le signal déclenchant éventuellement l'exécution du mouvement volontaire se produit lorsque l'activation de l'AMS atteint un certain seuil sous l'influence de cette boucle. Plusieurs des circuits impliquant les ganglions de la base ne sont cependant pas moteurs, mais sont plutôt impliqués dans la mémorisation et le traitement des processus cognitifs et émotionnels. Les ganglions de la base sont encore largement méconnus et semblent jouer un rôle beaucoup plus large que sa contribution au contrôle moteur.

Pour pouvoir effectuer un mouvement cohérent, la durée et l'enchaînement de chaque segment corporel doivent être coordonnés de façon très précise. Le cervelet assume, entre autres, cette fonction de réglage temporel de nos mouvements. Il entretient donc d'étroites relations avec le cortex. Les aires motrices, somatosensorielles et pariétales postérieures envoient un important contingent d'axones vers les noyaux du pont situés dans le tronc cérébral. Les neurones du pont projettent ensuite leurs axones dans le cervelet. En retour, les deux hémisphères cérébelleux relient le cortex moteur par une voie impliquant le thalamus. Les hémisphères cérébelleux influencent ainsi la musculature des membres via le cortex et participe à la régulation de la posture grâce à la modification du tonus musculaire.

1.2. Séquence d'activation des aires corticales

Le mouvement volontaire est donc l'aboutissement d'un effort intentionnel entrepris conjointement par les sous-systèmes présentés (cortex moteur, tronc cérébral, ganglions de la base et cervelet, cf. figure ci-dessous).

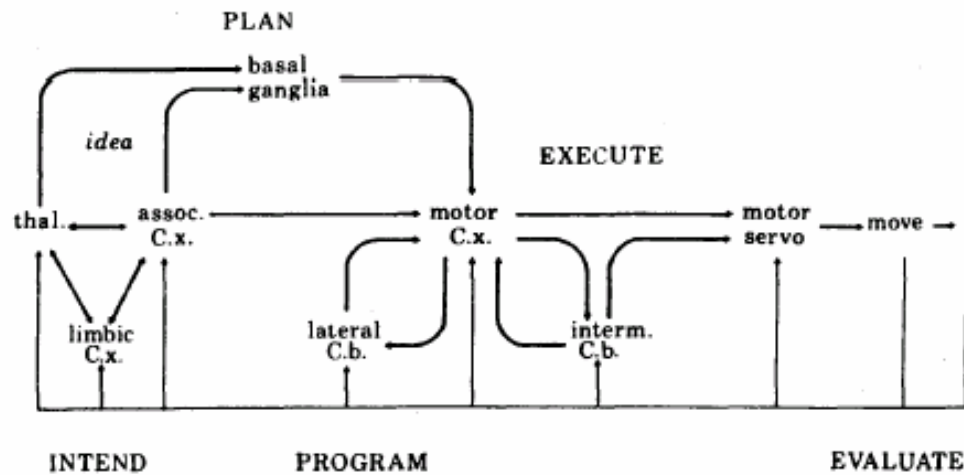


Figure I-2 : Schéma d'Allen et Tsukahara (1974) révisé et complété par Paillard (1982).

Ce schéma simplifié représente les circuits nerveux impliqués dans la production d'un mouvement. **Le compartiment d'exécution** (Execute) où les commandes élaborées au niveau cortical (Motor Cx, comprenant le cortex moteur primaire, les aires prémotrices et les aires motrices supplémentaires) s'expriment sur les servo-moteurs du niveau spinal, générateur des actions musculaires, en passant par le tronc cérébral. Ces structures bénéficient de l'assistance du cervelet (interm Cb). Ce dernier intervient parallèlement aux réafférences sensorielles, par deux boucles de régulation se fermant sur le cortex moteur et le tronc cérébral qui assistent le mouvement en cours d'exécution. **Le compartiment de programmation** (Program) est essentiellement constitué par la boucle néocérébelleuse qui, par la voie du cervelet latéral (Lateral Cb), projette essentiellement sur le cortex prémoteur. **Le compartiment planification** (Plan) s'articule sur les ganglions de la base (Basal Ganglia) et comprend deux boucles régulatrices : (1) les boucles motrices rejoignant les aires motrices supplémentaires et prémotrice via le putamen et (2) les boucles cognitives qui associent les noyaux caudés aux structures associatives préfrontales (Assoc Cx, constitué du cortex préfrontal, pariétal et temporal). **Le compartiment d'initialisation intentionnelle** (Intend) de l'action s'intéresse à l'ensemble des cortex associatifs frontaux, pariétaux et temporaux alimentés par les activités des structures limbiques (Limbic Cx) et les noyaux sensoriels et associatifs du thalamus (Thal.).

Cet effort est organisé de façon hiérarchique où un premier niveau s'occupe à définir les stratégies motrices, c'est-à-dire les objectifs du mouvement et les comportements à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs. Le cortex préfrontal est sollicité pour l'élaboration de la planification du mouvement. Le cortex frontal reçoit lui-même un important contingent d'axones du cortex pariétal. Celui-ci étant impliqué dans la perception spatiale, son analyse de la position du corps et des différents membres dans l'espace est essentiel à la préparation d'un mouvement. Les ganglions de la base sont également des structures cérébrales impliquées à ce niveau.

Dans un second temps, les aires motrices secondaires (APM et AMS), en collaboration avec le cervelet travaillent sur le séquençage précis des activations musculaires requis pour effectuer l'acte moteur choisi.

Enfin, le cortex moteur primaire et le tronc cérébral relient la moelle épinière, via la voie latérale (faisceau cortico-spinale ou pyramidale), et entrent en jeu afin de produire la contraction musculaire. Le cortex moteur primaire détermine la force requise que les différents muscles doivent exercer. Après décussation au niveau du tronc cérébral, il transmet ensuite ces informations aux motoneurons alpha et aux interneurons spinaux situés au niveau de la moelle épinière. Ainsi ces derniers constituent les circuits spinaux, et pour reprendre l'expression de Charles Sherrington, forment la « *voie finale commune* » de la motricité. Cette voie finale commune relie la moelle épinière aux muscles générant le mouvement en tant que tel, ainsi que les ajustements posturaux qui l'accompagnent et dont nous verrons la fonction un peu plus loin dans ce chapitre.

2. MODE DE CONTROLE DU MOUVEMENT

Les théories du contrôle du mouvement se sont fortement inspirées de l'approche cybernétique de l'automatique (science de l'automate et des robots). Ainsi, le mouvement humain s'appuierait sur deux modes de contrôle : les contrôles en Feedforward et Feedback, plus communément connus sous les noms respectifs de boucle ouverte et boucle fermée.

Le contrôle en boucle ouverte est la forme la plus simple du contrôle cybernétique (cf. figure I-3). Il impose une programmation très fine du contrôleur sur l'effecteur sous peine d'un grand écart entre l'état désiré et la production. Ce mode de contrôle fait directement référence à la notion de programmation motrice. Ainsi, un programme moteur serait formé par le contrôleur sur la base de consignes spécifiques à la réalisation du mouvement. Ce programme moteur serait ensuite transmis aux effecteurs pour la production. Ce mode de contrôle est alors défini comme un système proactif.

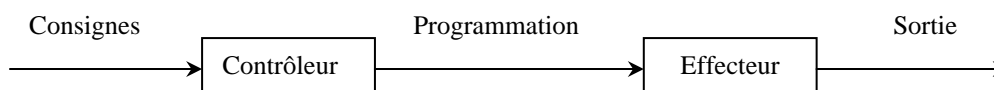


Figure I-3 : Principe d'un système en boucle ouverte.

Le système en boucle ouverte est la forme la plus simple de contrôle dans les théories cybernétiques. Le contrôleur effectue une programmation en fonction d'un état désiré (consignes) et la communique au système effecteur en vue de la production.

Malheureusement, comme tout programme informatique, ce dernier peut comporter des erreurs pouvant engendrer un écart entre l'intention d'action du sujet et l'action réellement produite.

Sur ce système de contrôle en boucle ouverte vient donc se « greffer » un rétrocontrôle afin de diminuer ces écarts (cf. figure I-4). Un capteur fournit une information lors de la production qui est utilisée comme signal d'erreur par le contrôleur. Ce signal se soustrait à la consigne permettant d'estimer et de corriger la programmation du contrôleur en tant réelle afin d'ajuster et de diminuer les erreurs perçues par le capteur. Nous parlerons alors d'un processus rétroactif. Le problème majeur de ce type de contrôle provient du délai nécessaire et incompressible pour que le signal d'erreur soit véhiculé du capteur sensoriel à l'intérieur de cette boucle de rétroaction. On estime par exemple un délai de 50 ms pour que l'information visuelle soit prise en compte par le SNC.

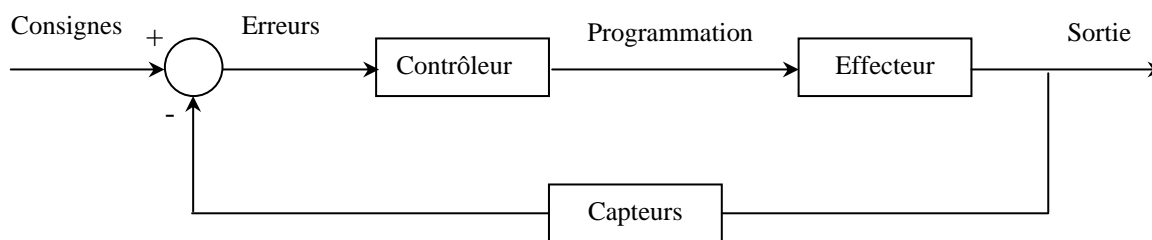


Figure I-4 : Principe d'un système en boucle fermée.

Dans un système en boucle fermée, le contrôleur dispose, grâce aux capteurs, d'informations sur la production de l'effecteur en temps réel. Il peut donc mettre en place une programmation non seulement en fonction des consignes mais aussi en fonction de l'erreur détectée entre les consignes et la production.

L'adjonction d'un système proactif parallèle à ce système rétroactif permet donc de s'affranchir de ces délais nécessaires aux systèmes sensoriels pour détecter les erreurs lors de la production par rapport à l'état désiré (cf. figure I-5). Le contrôle du mouvement résulte donc de la combinaison de l'action des deux modes : un contrôle en boucle fermée, qui tient compte en temps réel des réafférences sensorielles, et un mode en boucle ouverte, avec une rapidité d'exécution plus importante mais une précision plus faible.

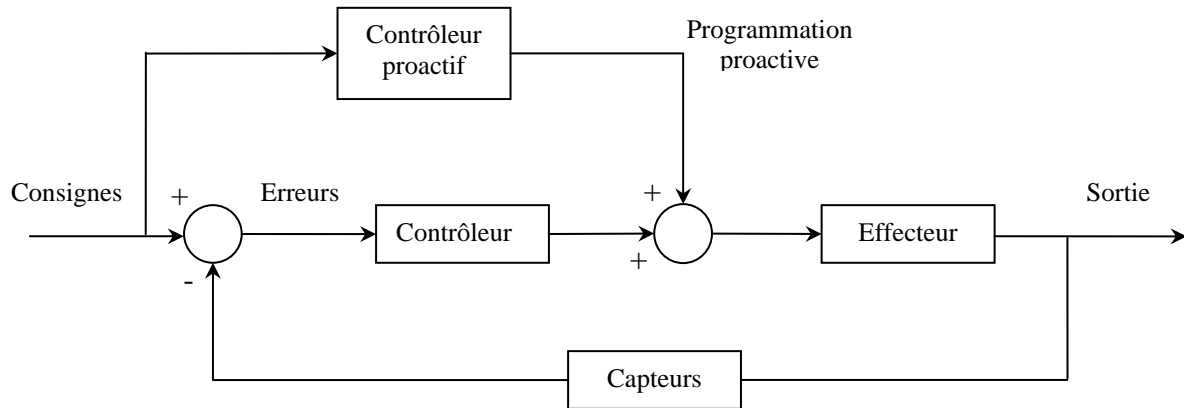


Figure I-5 : Principe d'un système de contrôle proactif

L'ajout d'un contrôle proactif permet de s'affranchir du délai de la boucle de rétroaction en anticipant grâce à un contrôleur proactif en parallèle.

3. PROGRAMME MOTEUR

Comme nous venons de le voir, les fonctions des différentes aires corticales nous permettent de dégager une organisation spécifique comprenant une identification des informations sensorielles, une sélection et une planification du mouvement à réaliser ainsi qu'une programmation permettant entre autre d'ajuster la force requise. De plus, les théories du contrôle moteur démontrent qu'un mouvement peut être exécuté sans l'intervention de réafférences sensorielles. Ces deux caractéristiques de la production du mouvement sont non sans rappeler la notion de programme moteur issue de l'informatique naissante des années 50-60. Un programme informatique est une suite de commandes ou instructions stockée en mémoire et exécutée sans intervention externe ou prise d'information pendant son exécution. Etymologiquement, programme signifie *ce qui est écrit d'avance*.

Henry et Rogers (1960) sont les précurseurs de la notion de programmation motrice et conçoivent donc la production du mouvement humain comme une suite d'opérations sélectionnées et paramétrées avant le début du mouvement. Keele (1968) est considéré comme l'un des plus influent en matière de conceptualisation du programme moteur (Lépine Glencross et Requin, 1989). Il propose deux raisons justifiant l'importance de la programmation motrice dans le contrôle du mouvement. D'une part, une activité motrice peut être maintenue après désafférentation du membre sollicité, et ce, même en l'absence de contrôle visuel. Nous avons vu l'importance des réafférences sensorielles dans les théories du contrôle moteur. D'autre part, cette activité motrice peut être exécutée de manière très rapide et correcte alors que nous n'imaginons pas que des réafférences sensorielles puissent avoir le

temps d'intervenir. Par exemple, Wadman et al. (1979) ont montré un patron identique d'activation électromyographique (EMGs) de l'agoniste (Triceps) et de son antagoniste (Biceps brachial) dans deux situations d'extension du coude : lorsque celui-ci est libre ou bloqué mécaniquement au départ. Il a ainsi été proposé que les commandes centrales du mouvement étaient organisées, planifiées avant même le début du mouvement. En d'autres termes, on peut identifier en amont du geste, différentes opérations cognitives de nature perceptive, décisionnelle et motrice (Sanders, 1990). Les aspects généraux du mouvement seraient alors spécifiés à un niveau élevé des mécanismes de traitement cognitif (Hauert et al., 1990). Pour Schmidt (1975), ces programmes moteurs seraient stockés sous forme de programmes moteurs généralisés (PMGs). Ce concept est comparable à « l'engramme moteur » de Bartlett, (1932, cité par Hauert et al., 1990) et au « neuromotor plan » de Henry et Rogers (1960). Ce serait donc une forme de structures abstraites regroupant une classe de mouvement composée de caractéristiques invariantes et d'éléments variables (Schmidt, 1975 ; Shapiro et Schmidt, 1981). L'aspect invariant résiderait dans le timing relatif à la structure temporelle de la commande motrice au niveau cinématique (Soechting et Laquaniti, 1981) et neuromusculaire (Carter et Shapiro, 1984). En dépit d'une modification de certains paramètres de l'écriture (durée totale, grosseur des lettres, etc..) la proportion du temps pris par chaque lettre reste invariante (Shapiro et al. 1981, Viviani et Terzuolo 1980). Néanmoins, dès lors que ce PMG est sélectionné, il doit être adapté aux conditions particulières de la tâche et permet donc une adaptation spécifique du programme moteur au contexte. Par exemple, les courbures et la taille d'une même lettre sont modifiées en fonction de la position de la lettre dans le mot (Wing, 1983).

Sans que l'existence même du programme moteur soit remise en cause, le contenu de cette structure assurant le contrôle central du mouvement a fait l'objet de nombreux débats. Les questions alimentant les discussions s'articulaient, pour une grande part, autour des instructions le composant. En effet, le concept de programme moteur induit une charge de traitement élevée en termes de degrés de liberté à contrôler simultanément (paramètres à spécifier ou pire encore, les commandes spécifiques adressées à chaque unité musculaire). Par conséquent, cela rend le contenu de la commande motrice trop lourd et trop complexe pour le système. De plus, la construction des structures invariantes, autrement dite, l'origine des programmes moteurs généralisés, n'est pas expliquée par la théorie.

4. CHRONOMETRIE MENTALE

L'utilisation de la chronométrie mentale dans le domaine de la psychologie cognitive répondait à la nécessité de comprendre et d'expliquer le fonctionnement des opérations mentales. Ces dernières étant non directement observables, le paradigme de la chronométrie mentale permet de mesurer le temps nécessaire aux processus mentaux pour réaliser une tâche. Cette méthode d'analyse consiste à mesurer le temps qui s'écoule entre l'apparition d'un stimulus et le déclenchement d'une réponse appelé le Temps de Réaction ou TR. La procédure chronométrique consiste en la présentation d'un Signal Préparatoire (SP) suivi, au delà d'une Période Préparatoire (PP) d'un Signal Impératif (SI) auquel le sujet doit répondre le plus rapidement et précisément possible (cf. figure I-6). A chaque élément de la procédure peuvent être associées des opérations de traitement de l'information. Ainsi, la période préparatoire correspondrait à des processus de préparation, et de préprogrammation¹ et le TR représenterait les opérations de traitement sur les versants perceptif, décisionnel et moteur. Le TR représente donc le temps nécessaire et incompressible permettant d'initialiser un mouvement (Klapp, 1978), rendant compte directement de la difficulté de la planification de celui-ci.

4.1. Principe

L'utilisation du concept de la programmation motrice dans un mode de contrôle proactif suggère la mise en place d'un Système de Traitement de l'Information (STI) au sein du SNC. Le temps de réaction (TR) représente le temps nécessaire au canal de communication pour transmettre un certain nombre d'unités informationnelles (Hick, 1952). Le débit informationnel représentant la vitesse de transmission de l'information fait directement référence cette notion de STI de Shannon et Weaver (1949). Selon la théorie de Shannon, si l'apparition d'un événement est fort probable, sa quantité d'information sera faible et le traitement de cette information sera alors peu coûteux pour le système. Ce STI serait assimilé à un « canal unique » de transmission de l'information ayant une capacité de traitement limitée. Le postulat du canal unique de traitement a été proposé dans les années 50 par les tenants du phénomène de « réfractorité psychologique » (Welford, 1952 ; Smith, 1968), période où le système ne peut pas opérer sur l'information suivante. Cette voie de circulation serait alors unique « single channel » et une seule information pourrait être traitée à la fois.

¹ La préprogrammation fait partie intégrante d'une certaine préparation du mouvement. Cependant, nous allons voir qu'il existe une certaine préparation ne comprenant pas de préprogrammation du mouvement, à savoir la préparation neutre (cf. page 24).

Les travaux de Hick (1952) ont permis de préciser que le temps pris pour traiter l'information augmente proportionnellement à la quantité d'informations traitées. La loi établie par cet auteur est la suivante : $TRC = a + b (\log_2 N)$ où a et b sont des constantes, $\log_2 N$ étant la quantité d'information en bits et N le nombre d'éventualités. Cette équation permet de supposer que l'être humain traite l'information à vitesse constante, de l'ordre de 5 bits/s chez l'adulte. Cependant, Hick précise que la validité de sa logique équationnelle est fortement dépendante du nombre d'erreurs de réponse. Le sujet améliore sa vitesse de traitement de l'information si et seulement si la diminution du TRC ne correspond pas à une augmentation proportionnelle du taux de réponses incorrectes. Les travaux de Welford (1976) montre qu'il est impossible de traiter l'information au-delà d'une certaine quantité. Il pose ainsi les bases d'une capacité de traitement limité faisant directement référence à la capacité attentionnelle du sujet. Cette limite suggère l'existence d'une interférence entre deux opérations s'exécutant simultanément.

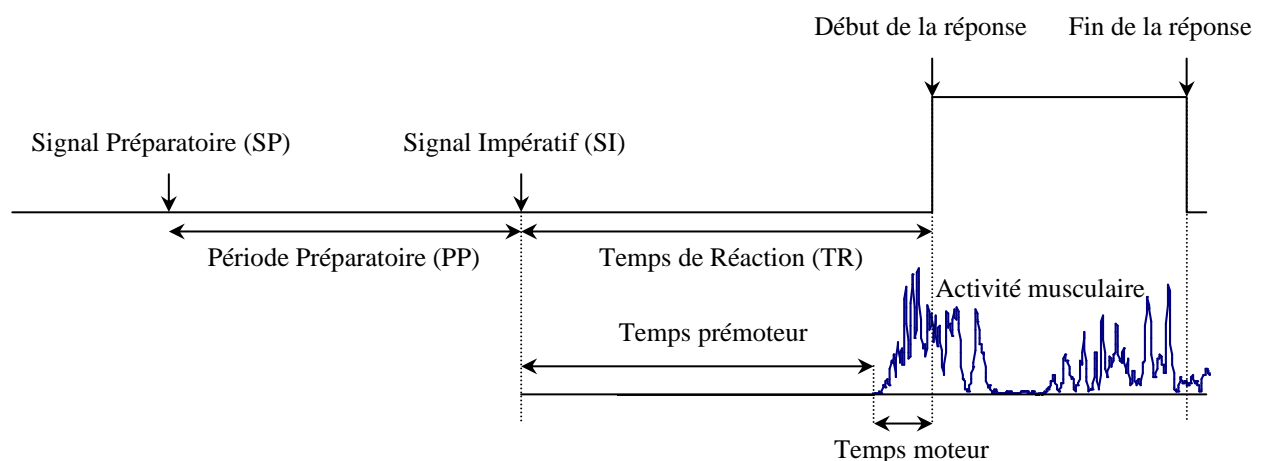


Figure I-6 : Déroulement temporel de la chronométrie mentale.

La période préparatoire est définie par un laps de temps séparant le signal préparatoire d'un signal impératif. Le sujet a pour consigne de répondre le plus rapidement possible après le SI. Le temps de réaction constitue donc le temps écoulé entre le SI et le début de la réponse. L'activité du muscle responsable du mouvement permet de dissocier un temps pré-moteur et un temps moteur constitutifs du temps de réaction.

Selon les besoins de l'étude, le TR peut être dissocié en un temps pré-moteur et un temps moteur grâce à l'enregistrement électromyographique (EMG) du muscle principalement responsable du mouvement (prime mover). Le temps pré-moteur sépare le SI du début de l'activité EMG du prime mover et reflète uniquement les processus centraux liés

à la tâche. Le temps moteur, quant à lui, est défini par le temps séparant le début de l'activité EMG du début du mouvement (cf. figure I-6). Il reflète ainsi le délai électromécanique permettant au muscle « prime mover » de produire suffisamment de force pour générer un mouvement directement observable. La dichotomie du TR par ces deux variables permet donc de différencier la part centrale de la part périphérique du TR (Weiss, 1965 ; Anson, 1982 ; Klapp, 1996).

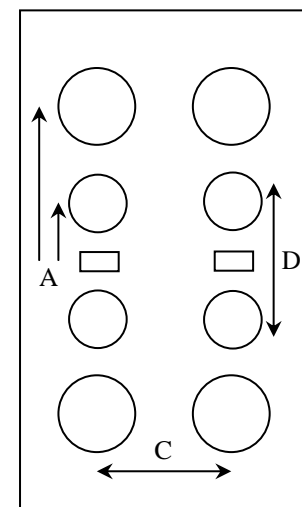
4.2. Procédure de Temps de Réaction Simple (TRS)

Les premières recherches chronométriques consacrées à l'étude des processus de programmation motrice ont utilisé une procédure de temps de réaction simple (TRS). Cette procédure est caractérisée par la connaissance, avant le SI, de toutes les informations caractérisant le mouvement à produire. Henry et Rogers (1960) en sont les précurseurs. Le protocole expérimental consistait en la réalisation de trois tâches motrices distinctes : mouvement A, une simple élévation du doigt ; mouvement B, une simple élévation du doigt suivie d'une extension pour attraper une balle suspendue et mouvement C, un mouvement nécessitant une simple élévation du doigt suivie par de nombreux changements de direction vers des cibles. Les résultats obtenus montrent que le TRS augmente proportionnellement à la complexité du mouvement. Ainsi, ces auteurs considèrent que le temps de programmation d'un mouvement est dépendant du programme moteur spécifiant le nombre et la nature des muscles à contracter ainsi que l'ordre et la durée de leur contraction. La critique majeure formulée au regard de cette procédure concerne la possibilité d'une programmation anticipée du mouvement. Le mouvement à réaliser est en effet connu à l'avance et le moment d'apparition du SI est prédictible. Ainsi, les processus de programmation opèrent avant l'apparition du SI et le TRS ne mesure pas précisément le temps de détermination des commandes motrices. Les auteurs à l'origine de cette critique considèrent que la procédure de TRS présente l'inconvénient d'inciter le sujet à synchroniser sa réponse avec l'apparition du SI (Klapp et al., 1974 ; Martenuik et MacKenzie, 1981 ; Sheridan 1981). Afin de remédier à ce problème d'anticipation, nous avons recours à l'utilisation de quelques essais dits « à blanc », c'est-à-dire, des essais où le SI est absent. Ainsi, bien que connaissant tous les paramètres du mouvement à exécuter, le sujet n'a pas d'autres choix que de ne pas répondre.

4.3. Procédure de Temps de Réaction de Choix (TRC)

Afin de remédier au problème d'anticipation lié à la procédure de TRS, une procédure de temps de réaction de choix peut être mise en place (Posner et Boies, 1971 ; Fiori et al., 1974). Cette procédure confronte le sujet à une situation où l'incertitude sur le mouvement à produire n'est levée qu'à l'apparition du SI. Ainsi, les sujets sont confrontés à plusieurs paires Stimulus-Réponse (S-R) et doivent sélectionner la réponse correspondant au stimulus particulier. Les résultats de ces travaux confirment ceux obtenus avec la procédure de TRS. Comme pour le TRS, il a été montré que le TRC augmente en fonction de la complexité du mouvement (Smith, 1968).

Plusieurs techniques ont été développées pour évaluer plus spécifiquement les différentes étapes de la programmation du mouvement, ainsi que leur coût temporel. Ainsi, la technique de pré-information ou « pre-cuing » (Rosenbaum, 1980) permet de mesurer le temps nécessaire à leur programmation. Dans cette procédure, le signal préparatoire spécifie un ou plusieurs paramètres du mouvement de pointage à effectuer (côté, direction, amplitude). Pour cela, huit cibles étaient présentées de manière à bien dissocier les trois paramètres (côté C, direction D et amplitude A). Une ou plusieurs de ces informations étant connues à l'avance, le TR représente alors le temps nécessaire aux processus de programmation pour spécifier les valeurs des paramètres non connues avant le SI.



Possibilités d'action en fonction des trois paramètres du mouvement

Une autre méthode a été proposée par Rosenbaum et Kornblum (1982) pour étudier les paramètres spatiaux du programme moteur. Cette méthode, inspirée de la méthode de Posner et Snyder (1975) est appelée procédure d'amorçage ou « priming ». Elle consiste à présenter au sujet, durant le SP, une information complète, appelé amorce sur la réponse la plus probable, information qui est biaisée par un indice de probabilité d'apparition. L'hypothèse de base de la méthode d'amorçage suggère que le sujet utilise l'amorce pour spécifier à l'avance l'ensemble des paramètres composant le mouvement. Deux situations sont alors possibles. Premièrement, dans un exemple d'indice de probabilité 80/20, dans 80 % des cas, le SI correspond à l'information préalable. L'amorce est qualifiée de « valide ». Dans les autres essais (20 %), le SI ne correspond pas à l'amorce présentée. Ces essais sont alors qualifiés « d'invalides ». Dans ce contexte, l'augmentation du TR représente le temps nécessaire de

déprogrammation et reprogrammation des paramètres incorrects de la réponse motrice préparée durant la PP (Rosenbaum et Kornblum, 1982 ; Lépine, Glencross et Requin, 1989).

4.3.1. Méthodes chronométriques

L'idée d'une structure hiérarchisée de traitement de l'information (associée à l'hypothèse du canal unique de traitement) est une des hypothèses les plus anciennes de la psychologie expérimentale. Cette hypothèse concerne la séquentialisation du traitement de l'information (Welford, 1952 ; Theios, 1975). Selon le principe sériel, les différents processus mentaux qui composent le système se déroulent successivement et sans recouvrement temporel selon un ordre déterminé. Ainsi, l'hypothèse séquentielle présente une organisation des différents processus mentaux en termes d'étapes ou de stades de traitement correspondant à une opération ou à une série d'opérations consacrées à une fonction particulière. Cette formalisation du système de traitement de l'information en plusieurs stades de traitement a été mise en évidence par les travaux de Donders (1868) à travers sa méthode soustractive. Cet auteur considère que la soustraction d'un TR d'une tâche A à n stades à une tâche B à $n+1$ stades permet d'inférer sur la durée de traitement du stade additionnel. Cette idée repose sur le postulat de la pure insertion. Ce postulat considère la conservation de l'équivalence en matière de traitement d'une tâche à une autre tâche à laquelle un stade supplémentaire a été ajouté ($TR_A n = TR_B n$). Suite aux critiques essentiellement ciblées sur ce concept de la pure insertion de la méthode de Donders, Sternberg (1969) proposa la méthode des facteurs additifs (MFA). Cette procédure permet d'identifier les propriétés des opérations mentales et leur séquençement, mais n'a pas pour vocation d'en estimer la durée. La nature de ces propriétés peut être définie par l'étude des effets individuels et combinés de variables expérimentales sur le TR. Soit u l'effet du facteur F et v l'effet du facteur G, w représente l'effet du facteur combiné des facteurs F et G. Lorsque l'effet combiné des variables correspond à une additivité des effets individuels ($u + v = w$), ces facteurs affectent des stades différents. Par contre, si l'effet combiné correspond à une interaction des deux facteurs, les facteurs F et G affectent en commun au moins une étape de traitement.

Grâce aux différentes procédures (TRS et TRC) et méthodes (méthode soustractive et MFA), trois principales fonctions du canal de traitement ont pu être identifiées : la perception du stimulus, la sélection de la réponse et la programmation motrice (Theios, 1975 ; Schmidt, 1988). Les opérations perceptives prélèvent les informations issues de l'environnement, les encodent en vue du traitement. Les opérations décisionnelles déterminent la réponse

appropriée au stimulus présenté (Kerr, 1978). Enfin, les opérations de programmation déterminent et calibrent les paramètres de l'action en vue de la réalisation du mouvement. Le modèle auquel il est le plus souvent fait référence est celui proposé par Theios (1975). Ce modèle sériel différencie 5 stades de traitement dissociés en deux compartiments perceptif et moteur (cf. figure I-7). Le compartiment perceptif est composé de l'encodage du stimulus et de l'identification du signal situé en amont de la chaîne de traitement. Les trois autres stades appartiennent au versant moteur et sont qualifiés de stades de détermination de la réponse, de spécification des paramètres du programme moteur et d'ajustements moteurs. Ainsi, la manipulation du stimulus affecte le versant perceptif alors que la manipulation de la réponse affecte le versant moteur.

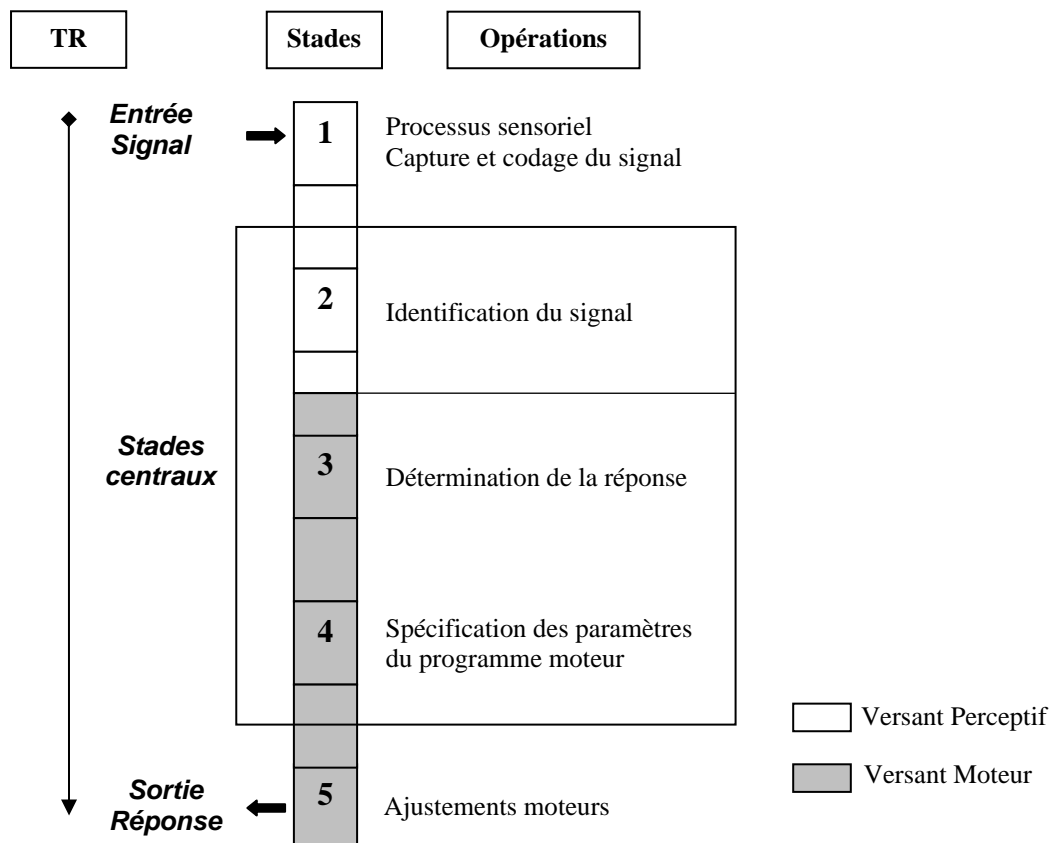


Figure I-7 : Modèle sériel du traitement de l'information.

Classification des stades de traitement en fonction des versants perceptif et moteur de la chaîne de traitement (d'après Theios, 1975).

Sanders (1990) proposa d'affiner la modélisation de la structure du STI proposée par Theios et de localiser l'effet de certains facteurs expérimentaux. Ce modèle comporte deux stades supplémentaires ainsi qu'un versant décisionnel additionnel. Le *versant perceptif* comporte trois stades, un stade de prétraitement, d'extraction des caractéristiques et un stade

d'identification. Le *versant décisionnel* est représenté par un stade spécifique de sélection de la réponse. Enfin, le *versant moteur* se compose de l'étape de programmation, de chargement du programme et des ajustements moteurs. Grâce à la MFA de Sternberg (1969), Sanders, dans son modèle, a pu mettre en évidence la localisation de certains effets (cf. fig I-8). Par exemple, *le nombre d'alternatives* ainsi que *la compatibilité S-R* affecteraient les étapes de sélection de la réponse alors que la durée de la période préparatoire affecterait plutôt le stade des ajustements moteurs.

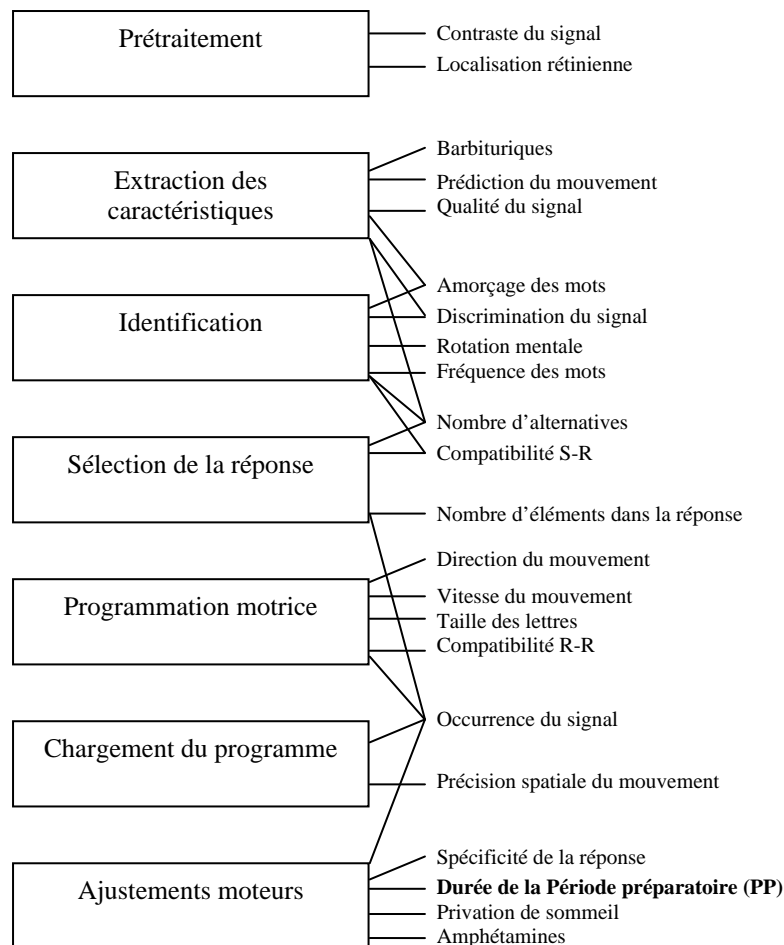


Figure I-8 : Modèle sériel du traitement de l'information.

Localisation des effets de certaines variables indépendantes (d'après Sanders, 1990).

4.3.2. Stades de traitement affectés par la durée de la PP.

L'utilisation de la MFA de Sternberg a permis de mettre en évidence des effets de la période préparatoire plus ou moins divergeant. En effet, le tableau 1 nous présente les variables ayant un effet additif ou d'interaction avec la PP. Suivant cette méthode, l'additivité

d'un facteur avec celui de la durée de la PP montre qu'ils affectent des stades différents. A l'inverse, l'interaction d'un facteur avec la durée de la PP montre qu'ils ont au moins un stade de traitement en commun. Par exemple, *la qualité du signal*, intervenant au niveau du stade d'extraction des caractéristiques possède un effet additif avec la durée de la PP. Par conséquent, ce résultat suggère que la durée de la PP n'intervient pas au niveau du stade d'extraction des caractéristiques.

MFA de Sternberg	Facteur (u) manipulé avec la durée de la PP (v)	Stade influencé par le facteur	Interprétation de la MFA
Effet additif	Qualité du stimulus	Extraction des Caractéristiques	
	Contraste du signal	Extraction des Caractéristiques	
	Prédiction du mouvement	Extraction des Caractéristiques	Durée de la PP et autre
	Fréquence de mouvement	Extraction des Caractéristiques	facteur affectent des stades
	Compatibilité S-R	Identification et Sélection	différents
	Nombre d'alternatives	Sélection de la réponse	
	Occurrence du signal	Chargement du programme	
Effet d'interaction	Contraste du signal auditif	Extraction des Caractéristiques	
	Contraste du signal auditif x compatibilité S-R	E. C. et Sélection	Durée de la PP et autre
	Compatibilité S-R	Identification et Sélection	facteur affectent au moins un
	Occurrence du signal	Chargement du programme	stade en commun
	Occurrence du signal x tension musculaire	Chargement du programme	
	Vitesse du mouvement	Ajustements moteurs	

Tableau I-1 : Localisation de l'effet de la durée de la période préparatoire dans la chaîne de traitement (adapté de Sanders, 1980, p. 342).

Ce tableau regroupe différents travaux permettant de localiser l'effet de la période préparatoire en fonction de son effet d'additivité et d'interaction avec d'autres variables indépendantes présentées. L'additivité d'un facteur avec la PP montre qu'ils affectent des stades différents. A l'inverse, l'interaction d'un facteur avec la PP montre qu'ils ont au moins un stade de traitement en commun. Noter que les paramètres ayant un effet d'interaction avec la PP sont les stades en aval de la chaîne de traitement.

Il est intéressant de constater que les facteurs ayant un effet d'interaction avec la durée de la PP sont principalement les stades en aval de la chaîne de traitement. En effet, nous pouvons observer des effets d'interaction de la durée de la PP avec les facteurs « vitesse du mouvement » et « tension musculaire » (utilisés comme variables indépendantes dans les travaux de Sanders, 1979). Dans cette étude, Deux périodes préparatoires constantes d'un essai à l'autre ont été utilisées (1 et 10 sec) suivant deux conditions de tension musculaire (une condition où le muscle focal était étiré durant la PP et une condition où le muscle était relaxé pendant toute la durée de la PP). Sanders observa un effet additif de la variable tension musculaire avec la durée de la PP lors de la consigne de relaxation musculaire. A l'inverse, un effet d'interaction a été montré lorsque ce muscle focal était préalablement étiré durant la PP.

Ainsi, l'activité EMG et la durée de la PP affectent bien au moins un stade de traitement en commun. Dans la condition de relaxation musculaire, le TRC est long lors d'une durée de PP courte suggérant une moindre préparation. Ce résultat est donc en accord avec l'interprétation de l'effet de la durée de la PP sur le stade des ajustements moteurs (Frowein et Sanders, 1978 ; Spijkers et Walter 1985; Sanders 1990; Brown et Robbins 1991, Rihet et al. 2002). Lorsque les ajustements moteurs nécessaires sont effectués (c'est-à-dire un muscle préalablement étiré), le TR est plus rapide. Si le sujet ne se prépare pas, alors l'effet de la durée de la PP est considérablement réduit. Le stade des *ajustements moteurs* est le dernier processus de traitement de l'information avant l'exécution de la commande motrice et aurait pour fonction de rendre le niveau d'activation des effecteurs musculaires compatible avec le déclenchement de la réponse (Sanders, 1980 ; 1983). Une série d'études a permis de confirmer l'effet de la PP sur ce stade de traitement. Yuanhui et Kasai (1993) ont mis en évidence, grâce au temps prémoteur du biceps brachial, un optimum de préparation identique lors de la supination de l'avant-bras et de la flexion du coude (2 à 2.2 s). Cependant, l'effet de la PP paraît plus important lors du mouvement de supination de l'avant-bras (gain de 10.6 ms). La durée de la PP aurait alors une influence plus importante sur les fonctions auxiliaires d'un muscle (supination de l'avant-bras) par rapport à sa fonction primaire (flexion du coude). Ce résultat confirme, en outre, l'hypothèse selon laquelle la complexité du mouvement et la préparation de la réponse (durée de la PP) ont un effet additif, suggérant ainsi que ces deux facteurs influencent des étapes de traitement différents. Enfin, Mattes et Ulrich (1997) ont analysé la production de la force et le TR associé au mouvement de presse-bouton en fonction de trois durées de PP (500 ms, 1750 ms et 3000 ms). Les résultats montrent une production de force plus importante lorsque le TR est long. En d'autres termes, le niveau de force produit pour une tâche est dépendant de l'incertitude temporelle de la préparation (durée de la PP). Cet effet de la PP semble refléter un ajustement moteur intrinsèque et par conséquent renforcerait les conclusions développées par Sanders (1990) sur la position de l'effet de la durée de la PP au niveau des stades en aval de la chaîne de traitement de l'information.

Ces études confirmeraient bien la validité de la MFA de Sternberg et affecteraient les effets de la durée de la PP au niveau du stade des *ajustements moteurs*. Cependant, l'évolution TR-force produite en fonction de la durée de la PP serait fortement dépendante du mode de présentation de la PP dans un bloc d'essai (Mattes et Ulrich, 1997). Nous verrons un peu plus loin dans ce chapitre les effets du mode de présentation de ce facteur.

Cependant, des effets aussi bien additifs que d'interaction de la durée de la PP sont observés avec la compatibilité S-R, le contraste et l'occurrence du signal. Cela tendrait à souligner une limite à la robustesse de la MFA. Néanmoins, il semblerait y avoir une explication à la divergence de ces résultats. En effet, l'effet additif de la PP avec le contraste du signal est mis en évidence pour des signaux visuels ou auditifs avec une intensité n'excédant pas 60 dB. Autrement dit, lorsque la discrimination du signal est importante, l'effet de la durée de la PP est réduit (Sanders, 1980). Le TR augmente de 80 ms lorsque la durée de la PP passe de 2 s à 20 – 40 s avec un signal auditif de 35 dB alors qu'il n'augmente que de 45 ms pour un signal de 85 dB.

Ainsi, le locus moteur de l'effet de la PP n'est pas contradictoire avec les résultats portant sur les tâches de détection visuelle. En effet, l'activité de préparation permettant de détecter un signal et l'activité de vigilance contribue largement au stade des ajustements moteurs (Klein et Kerr, 1974).

4.4. Préparation motrice

Pourquoi s'intéresser à la période préparatoire ? Une large part des comportements humains ne peut-être envisagée sans une référence quasi permanente à la notion de préparation, reconnue comme permettant une réalisation optimisée de ces comportements (cf. Wundt, 1886). Cette préparation nécessite la coordination de deux processus. Le premier processus est celui de la représentation conceptuelle du mouvement. Cette représentation contient le but à atteindre (l'intention), et détermine le plan de l'action et ses différentes phases (la nature des programmes à construire), ainsi qu'une évaluation anticipée de ses conséquences. L'opération de construction de la représentation conceptuelle du mouvement est souvent reconnue sous le terme de planification. Le plan d'action du niveau conceptuel devra ensuite faire l'objet d'une opérationnalisation, aboutissant à la programmation du mouvement et correspondant au deuxième processus.

Cette notion de préparation a été très largement étudiée au travers d'une variable appelée Variation Contingente Négative (Boxtel et Brunia, 1994 ; Hiraku et Sakuma 1996 ; Nagai et al., 2001). Cette mesure, issue de l'électroencéphalographie (EEG), correspond à une onde cérébrale à longue latence au potentiel négatif et dont l'amplitude témoigne du niveau de ressources sollicitées par la préparation de la réponse motrice. Lorsque le sujet se prépare à émettre une réponse, la Variation Contingente Négative est observée du côté controlatéral au mouvement (Philipova et al., 2001). Plus la Variation Contingente Négative est importante,

plus la préparation est effective. Afin de quantifier le niveau de préparation d'une réponse, la méthode de la chronométrie mentale peut aussi être utilisée. Lorsqu'une préparation est possible, elle prend place avant le TR, c'est-à-dire durant la période qui sépare le SP du SI, autrement dit durant la PP.

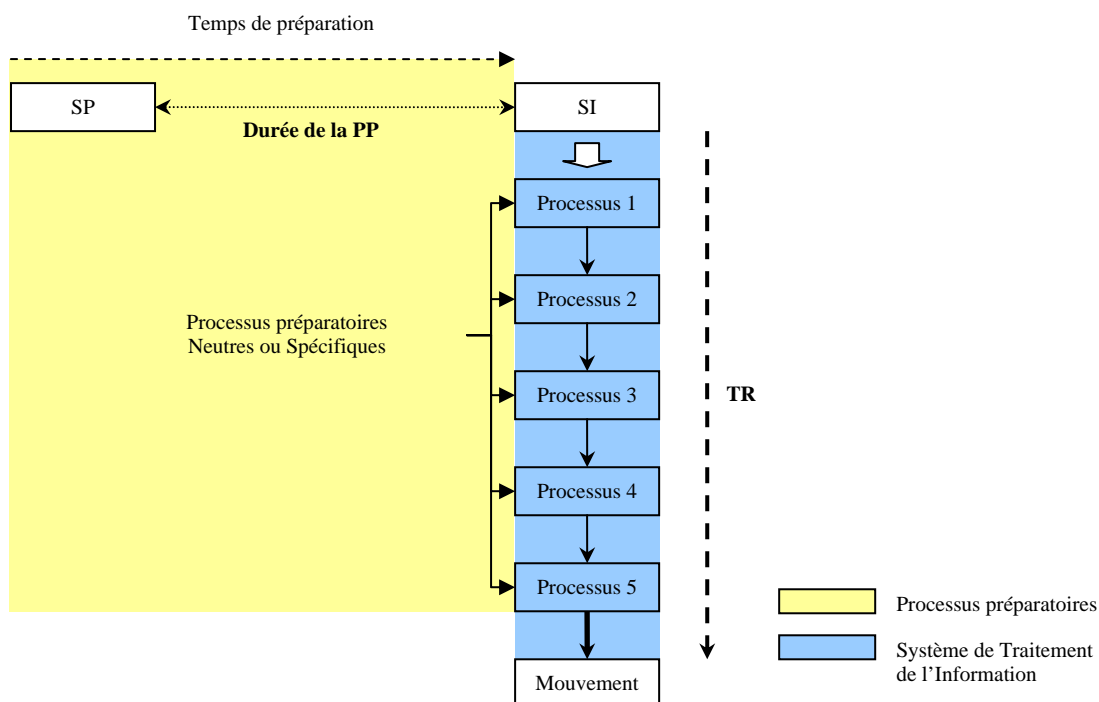


Figure I-9 : Schéma soulignant la position en dérivation des processus de préparation par rapport au Système de Traitement de l'Information (adapté de Requin, 1978).

L'hypothèse générale de la préparation motrice traduit les variations de TR, obtenues par exemple en manipulant la nature et/ou la durée de la préparation motrice, comme étant le résultat des écarts de niveau et/ou de qualité de cette préparation à l'apparition du SI. Ainsi, une réduction du TR est considérée comme l'expression des processus de préparation efficaces ayant pour conséquence une diminution du temps pris par les étapes de traitement (Guadagnoli et Reeve, 1992 ; Yuanhui et Kasai, 1993). Ces processus de préparation s'effectuent donc « en dérivation » par rapport aux opérations de traitement de l'information et peuvent influencer l'ensemble de ces étapes.

La procédure de priming est un parfait exemple d'outil permettant de mettre en évidence les processus de préparation (Rosenbaum et Kornblum, 1982 ; Lépine, Glencross et Requin, 1989). Lorsque l'information présentée durant le SP est considérée comme valide, nous assistons à une diminution du TR par rapport à la condition non-valide. Cette dernière

fait référence à une faible probabilité d'apparition du mouvement préparé durant la PP (cf. Procédure de temps de réaction de choix, page 16). Ce gain de TR d'une préparation valide à une préparation non-valide met donc en évidence l'importance de ce processus de préparation situé « en dérivation » par rapport à la chaîne de traitement.

4.4.1. Préparation Neutre vs. Sélective

Au sein d'une procédure de TRC, la manipulation du SP peut également modifier la nature de la préparation motrice. Deux types de préparation sont à distinguer (Holender, 1980). La capacité à développer et maintenir une vigilance optimale face à un stimulus peut être étudiée lorsque le sujet reçoit un signal préparatoire qualifié de non spécifique ou « neutre ». Ce signal ne donne aucune information sur la production du mouvement à venir, mais informe le sujet sur une prise d'information à effectuer en vue de réaliser un mouvement. Ce type de préparation, qualifié de neutre, correspond à une situation de vigilance pendant laquelle le niveau d'activation ou d'alerte augmente, mobilisant ainsi plus rapidement les opérations de traitement de l'information (Morrison, 1982).

A l'inverse, une préparation est qualifiée de « sélective » lorsque le SP porte à la connaissance du sujet un indice sur le mouvement à effectuer. Cette information est confirmée par la suite grâce au SI. Ainsi, durant la PP, le sujet dispose d'un certain temps pour planifier le mouvement et spécifier les paramètres déjà connus grâce aux informations à disposition (Rosenbaum, 1980 ; Rosenbaum et Kornblum, 1982). L'utilisation de la préparation sélective induit généralement la mise en place d'une tâche de Temps de Réaction de Choix (TRC). Cette préparation peut être soit partielle lorsque le ou les indices moteurs signalés au sujet au moment du SI ne sont pas complets (TRC :precuing) ; soit totale quand l'ensemble des caractéristiques du mouvement sont fournies au sujet par le biais du SP (TRS ou TRC :priming).

4.4.2. Effets de la Période Préparatoire (PP)

La manipulation de la durée de la période préparatoire est une autre variable indépendante permettant de modifier la nature de la préparation. Sa manipulation permet de déterminer le temps nécessaire pour atteindre un niveau de préparation optimal, c'est-à-dire, le temps nécessaire pour développer un état de préparation optimal. Cet optimum de préparation correspond donc à la durée de la PP à laquelle est associé le TR le plus court.

Depuis les résultats de Woodrow (1914), il est reconnu que la capacité de préparation d'une réponse n'est pas équitablement répartie sur une période donnée. Dans ses études, le TR le plus court a été obtenu pour une durée de PP de l'ordre de 2 à 4 s (temps nécessaire pour atteindre une préparation maximale). La durée de la PP fournit donc un cadre temporel de référence dans lequel le sujet peut préparer la réponse associée au SI. Il est raisonnable de supposer que si le sujet est capable d'estimer la durée de la PP, il serait capable de synchroniser sa préparation avec l'apparition du SI. Ainsi, la précision de l'estimation du temps serait inversement lié à l'incertitude temporelle du sujet concernant l'occurrence du SI (Klemmer, 1956). L'augmentation de l'incertitude temporelle diminuerait donc cette capacité d'estimation du temps durant un essai. Par conséquent, la durée ainsi que le nombre de PP distribuées durant un bloc d'essai ne semblent pas être des variables insignifiantes. Indubitablement, la tâche serait différente si les PPs étaient de même durée ou de durée variable d'un essai à l'autre. Dans le premier cas, les chances d'estimer l'apparition du SI seraient importantes et dépendantes de la durée de la PP. Dans le second cas, les chances seraient faibles, dues à une incertitude temporelle majeure. Une question importante concerne alors la durée permettant d'atteindre une préparation maximale après l'apparition du SP. L'interprétation des résultats reste difficile pour les tâches de TRS. En effet, tous les paramètres du mouvement étant connus avant l'apparition du SP, une réponse anticipée peut alors être mise en place avant l'apparition du SI ce qui biaise les interprétations sur la préparation maximale.

Ainsi, différentes stratégies de préparation peuvent être mises en évidence en fonction de la méthodologie utilisée. Les processus de préparation ne suivent pas une loi générale et dépendent de nombreux facteurs tels que le mode de présentation de la PP dans un bloc d'essai (Niemi and Näätänen, 1981). La présentation bloquée ou aléatoire de la PP sont les deux modes pouvant être utilisés dans une procédure de chronométrie mentale. Le mode bloqué consiste à présenter une durée de PP identique pour tous les essais d'un même bloc. Par opposition, la présentation aléatoire consiste à présenter une durée de la PP variable d'un essai à l'autre. Comme nous allons le voir, ces deux types de présentation montrent des stratégies de préparation différentes.

4.4.2.1. Stratégie d'estimation du moment d'apparition du SI

L'utilisation d'une méthodologie basée sur la présentation bloquée permet généralement d'obtenir une augmentation du TR en fonction de l'augmentation de la PP (Woodrow, 1914 ; Klemmer 1956 ; Drazin, 1961 ; Niemi et Näätänen 1981 ; Mattes et Ulrich, 1997 ; Correa et al., 2006). Ce résultat peut être expliqué par une incapacité à maintenir une préparation optimale sur une longue période. La PP influence les performances du sujet via une capacité imparfaite de l'estimation du temps. Les facteurs affectant le temps subjectif sont complexes et l'estimation du temps semble plus une affaire de jugement que de la simple perception (Orme, 1962 ; Fraisse, 1963 cités par Niemi et Näätänen, 1981). Une PP relativement courte permettrait d'estimer avec précision l'apparition du SI alors que l'allongement de cette PP permettrait d'augmenter l'incertitude temporelle² (Boons et Bertelson, 1961). Ce résultat suggère une détérioration progressive de la capacité du sujet à prédire l'apparition du SI lorsque la PP s'allonge, ce qui perturbe la synchronisation de la préparation de la réponse avec l'apparition du SI. Cependant, cette détérioration de la prédiction de l'apparition du SI peut atteindre une limite. Les travaux de Bevan et al. (1965) ont montré une absence d'effet de la durée de la PP lorsque celle-ci dépasse 80 s. Cependant, cette relation PP-TR est dépendante de la longueur de la PP. L'utilisation d'une PP relativement courte (inférieure à 2 secs) amène à une modification de cette relation. Le TR diminuerait à mesure que la PP augmente (Näätänen, 1974), ce qui conduirait à l'apparition d'un optimum de préparation.

4.4.2.2. Présence d'un optimum de préparation

La stratégie d'estimation du moment d'apparition du SI est donc biaisée par la manipulation d'une durée de la PP très courte. Lorsque cette durée varie avec un incrément très court (c'est-à-dire, 200 à 500 ms pour une durée de la PP maximale de 2 sec), les performances des adultes ressemblent à une fonction chaînette, en U (Bertelson, 1967 ; Bertelson et Tisseyre, 1968 ; Posner et Boies, 1971 ; Näätänen et al., 1974 ; Yuanhui and Kasai, 1993). Le TR diminue jusqu'à l'apparition de la PP « optimale » et augmente en s'en éloignant. Une série d'études a identifié cette PP optimale autour de 500 ms (Posner et Boies, 1971 ; Adams et Lambos, 1986 ; Mattes et Ulrich, 1997 ; Hasbroucq et al., 1997). Notons que les méthodologies couramment utilisées dans ce genre d'expérimentation sont des tâches de

² Cette explication renvoie directement à la théorie du temps scalaire ou « Scalar Expectancy Theory, SET » de Gibbon et al. (1984) cité par Correa et al. (2006).

reconnaissance de lettres ou des tâches de presse-bouton en réponse à des stimuli visuels ou auditifs. Des analyses neurophysiologiques et physiologiques de ce phénomène suggèrent que cette préparation optimale est associée à des processus d'activation au niveau des structures corticales (Macar et Bonnet, 1997 pour une revue de littérature). Cette activité de préparation est également associée à des processus d'inhibition ayant pour fonction d'augmenter le seuil de sensibilité des structures inhibées. Ces structures sont localisées au niveau cortico-spinal (Touge et al., 1993 ; Hasbroucq et al., 1997) et d'autres au niveau musculaire (Hasbroucq et al., 1999). Cette évolution du TR en fonction de la durée de la PP (c'est-à-dire, la présence d'un optimum de préparation) refléterait alors un processus passif, indépendant de toutes stratégies de la part du sujet (Woodrow, 1914). En d'autres termes, la présence d'un optimum de préparation montrerait une caractéristique intrinsèque du fonctionnement du SNC en fonction de la durée de la PP.

4.4.2.3. Extraction d'une information de la durée de la PP

Par opposition, le mode de présentation qualifié d'aléatoire consiste à moduler la durée de la PP d'un essai à l'autre. Les résultats issus de cette présentation sont à l'opposé des résultats obtenus lors de la présentation bloquée. En effet, le TR diminue à mesure que la PP augmente. Ce résultat est discuté en terme de probabilité d'apparition du stimulus. La durée de la PP permet au sujet d'extraire une information sur la probabilité d'apparition du SI provenant de l'écoulement du temps. En d'autres termes, plus le temps s'écoule depuis le SP, plus la probabilité d'apparition du SI augmente. Dans cette situation, l'attention est de plus en plus focalisée à mesure que le temps passe.

Par conséquent, la modulation de la relation durée de la PP-TR en fonction de la méthodologie utilisée reflète bien des stratégies différentes de préparation d'une réponse (Niemi et Näätänen, 1981; Requin et al., 1991). Cette capacité de synchronisation de la réponse avec l'apparition du SI (envisagée dans le cas d'une présentation bloquée) permet une amélioration de la préparation puisque le TR, autant en TRS que TRC, est plus court qu'en présentation aléatoire (Bertelson et Boons, 1960 ; Boons et Bertelson, 1961 ; Bertelson et Tisseyre, 1968).

4.5. Effet du vieillissement sur le système de traitement de l'information

De nombreuses études ont décrites la baisse de la performance avec l'âge tant au niveau du TR que du temps de mouvement (Larish et Stelmach, 1982 ; Goggin et Stelmach, 1990 ; Goggin et Meeuwsen, 1992). Ce ralentissement des processus de traitement de l'information a des effets importants sur les activités de la vie de tous les jours puisqu'il toucherait aussi bien les processus de préparation que de la programmation de la réponse motrice.

4.5.1. Préparation de la réponse

L'une des questions les plus souvent abordées concerne l'utilisation d'une pré-information afin de déterminer si les personnes âgées sont capables de préparer partiellement ou complètement une réponse à exécuter. Gottsdanker (1980, 1982) a présenté une variété d'expérimentation afin de déterminer comment le vieillissement affecte la préparation motrice (population de 18 à 93 ans). Ce dernier a utilisé une procédure de TRS consistant à presser un bouton en réponse à un stimulus auditif. Ces résultats ont permis de valider l'hypothèse selon laquelle les personnes âgées sont capables de préparer une réponse grâce à la diminution du TR observée. L'apport d'une ou plusieurs informations sur les caractéristiques du mouvement à exécuter peut-être utilisée par les personnes âgées lors de cette préparation. Dans cette optique, Stelmach, Goggin et Garcia-Colera (1987) ont étudié la préparation motrice chez les personnes âgées par le biais du paradigme de precuing de Rosenbaum (1980), en manipulant trois paramètres d'information, le côté, la direction et l'amplitude du mouvement à exécuter (cf page 16). La question centrale concernait le rôle des processus de planification d'une réponse dans l'augmentation du TR en fonction de l'âge (trois populations d'environ 20, 44 et 69 ans). Les résultats obtenus montrent que chaque groupe a la capacité d'utiliser une information durant la PP puisque le TR décroît à mesure que le nombre de paramètres du mouvement qui reste à spécifier lors du SI diminue. Notons que lorsque plusieurs paramètres du mouvement restent à spécifier lors de la présentation du SI, le processus de sélection de la réponse est fortement impliqué. L'interaction entre l'âge et le niveau d'incertitude (nombre de paramètres à spécifier) suggère que les personnes âgées ont un TR plus long par rapport aux deux autres groupes à mesure que le nombre de paramètres du mouvement restant à spécifier croît. L'augmentation du coefficient de régression linéaire entre le TR et le niveau d'incertitude de la tâche reflète bien ce résultat. Cependant, ces personnes âgées étaient plus

affectées que les jeunes adultes pour spécifier chaque paramètre restant à programmer (bras : 78 ms vs. 23 ms, direction : 77 vs. 34 ms et amplitude : 60 vs. 18 ms). Les auteurs en ont conclu que les personnes âgées ont quelques difficultés pour planifier le mouvement à l'avance et montrent un ralentissement du processus de sélection de la réponse particulièrement lorsque le nombre d'information, restant à traiter après la PP, augmente. Cependant, lorsque cette incertitude événementielle est nulle, autrement dit lors d'une tâche de TRS, les performances des personnes âgées étaient identiques à celles des jeunes adultes, renforçant ainsi l'idée d'un effet localisé du vieillissement sur le processus de *sélection de la réponse* dans la chaîne de traitement de l'information (Horack et al., 1984 ; Inglin et Woollacott, 1988 ; Stelmach et al., 1990 ; Rogers et al., 1992).

Néanmoins, cette préparation semblerait optimisée lorsque la durée de la PP est faible et constante d'un essai à l'autre. Lorsqu'elle s'allonge considérablement (13 s), le TR augmenterait fortement faisant référence à une capacité d'estimation du moment d'apparition du SI se dégradant fortement avec l'âge. Ce résultat observé par Strauss et al. (1983) confirmerait l'étude de Gottsdanker (1982) suggérant une diminution de la capacité à maintenir une préparation optimale sur une longue période avec l'âge.

4.5.2. Programmation de la réponse

Une autre série d'études a conduit à s'interroger sur l'effet de l'âge sur la capacité de programmation et de reprogrammation d'un mouvement (Larish et Stelmach, 1982 ; Stelmach, Goggin et Amrhein, 1988). Dans les deux expérimentations, une information est fournie aux sujets, information qui peut être correcte ou incorrecte (cas d'une reprogrammation). Ainsi, les sujets pouvaient préparer de façon complète le mouvement à réaliser durant la PP. Mais parfois, ils devaient modifier la planification du mouvement au moment de l'apparition du SI. Les résultats issus de l'étude de Larish et Stelmach (1982) ont montré une augmentation du TR et du temps de mouvement avec l'âge mais la qualité de processus de programmation et de reprogrammation ne semblaient pas être plus affectées par l'âge. Les sujets âgés prépareraient et reprogrammeraient au même titre que les jeunes adultes. En d'autres termes, ces processus resteraient intacts avec l'âge mais verraient leur temps de fonctionnement augmenter. Par conséquent, les personnes âgées montreraient un déficit dans le fonctionnement des processus de bas niveau, tels que la préparation d'un paramètre spécifique du mouvement, mais les processus de haut niveau, tels que la reprogrammation d'un mouvement, resteraient intacts.

Stelmach, Amrhein et Goggin (1988, cités par Goggin et Stelmach 1990) se sont intéressés au déficit lié à l'âge dans la coordination des deux mains lors d'une tâche motrice. Pour ce faire, la complexité de la tâche a été manipulée en utilisant une main, un mouvement symétrique des deux mains (même amplitude de mouvement) et une tâche bimanuelle asymétrique (amplitude de mouvement différent). L'hypothèse de travail de ces auteurs concernait l'effet de la complexité de la tâche et supposait une synchronisation plus difficile des deux mains lors de la tâche bimanuelle asymétrique. Les résultats ont montré que le TR et le temps de mouvement augmentaient avec l'âge dans toutes les conditions expérimentales avec une différence plus importante en fonction que la complexité du mouvement.

Enfin, Goggin, Stelmach et Amrhein (1989, cités par Goggin et Stelmach, 1990) ont examiné la différence d'âge dans la préparation et la reprogrammation du mouvement en fonction de la durée de la PP. Ces auteurs ont soumis l'idée que les effets de l'âge sur la préparation du mouvement dans les études antérieures pourraient être imprécise, due à la présence d'une PP et d'un temps de présentation du SP relativement long. Cette étude a donc manipulé la PP présentée de manière variable d'un essai à un autre d'une durée de 500 ms à 2 s. Les jeunes adultes et les personnes âgées sembleraient être affectés différemment par la durée de la PP. Les sujets âgés seraient moins efficaces pour reprogrammer un mouvement lorsque le temps de présentation du SP et la durée de la PP sont courts. Par conséquent, il existerait une différence dans l'utilisation de la durée de la PP en fonction de l'âge lorsqu'une reprogrammation est nécessaire.

En conclusion, les personnes âgées sont capables d'utiliser une préinformation afin de préparer leur mouvement. Cependant, cette préparation apparaît comme étant moins rapide que chez les jeunes adultes. La capacité à maintenir une préparation optimale sur une longue période se dégraderait avec l'âge. L'inertie de fonctionnement du SNC semblerait plus importante avec l'âge tout en conservant ses propriétés de préparation et de reprogrammation. Les facteurs tels que la complexité de la préparation, la durée de la PP ainsi que la programmation et la complexité de la tâche doivent être pris en compte lors d'expérimentations sur les personnes âgées.

En manipulant toutes les méthodologies précédemment évoquées (préparation neutre/sélective ; durée de la PP et présentation aléatoire/bloquée de cette durée) nous sommes en mesure de manipuler la qualité de la préparation du sujet relative à la réalisation

d'une réponse motrice. Cependant, toutes ces expérimentations portant sur la préparation motrice avait comme points de méthodologie en commun le fait que 1) les sujets devaient réaliser une réponse motrice n'impliquant pas de segments corporels importants (tâche de presse bouton : mobilisation d'un doigt), et 2) ces sujets engageaient une réponse sans contrainte posturale importante. En effet, ils étaient confortablement assis dans un siège réglable avec dossier et parfois accoudoir diminuant ainsi toutes contraintes liées au maintien postural lors de l'exécution de la réponse.

CHAPITRE II: POSTURE-ÉQUILIBRE-MOUVEMENT

Ce chapitre s'intéresse plus particulièrement à la relation existant entre la production d'un mouvement et ses conséquences sur l'équilibre posturale. Après une description de la fonction et du fonctionnement du contrôle postural, nous verrons au fil de ce chapitre que les conséquences posturales d'un mouvement peuvent être anticipées afin de conserver l'équilibre. Cependant, nous verrons également que la préparation anticipée d'une tâche posturo-cinétique impliquerait une relation non-monotone entre le degré de stabilité posturale et le niveau d'incertitude temporelle et événementielle inhérent à cette tâche. Se posera alors la question l'optimisation de la préparation face à une tâche impliquant une coordination entre la production d'un mouvement et la perturbation posturale générée par ce dernier.

1. VOIES CENTRALES DU CONTROLE DE LA POSTURE

Le contrôle de la posture et du tonus musculaire est assuré par les systèmes descendants médians et latéral issus du tronc cérébral. Le système ventromédian est constitué de quatre faisceaux descendants dont l'origine se situe au niveau du tronc cérébral. Il se compose a) des voies vestibulo-spinale et tectospinale, et b) des faisceaux reticulo-spinaux d'origine pontique et bulbaire.

Les voies vestibulo-spinale et tectospinale sont deux systèmes contrôlant la position de la tête par rapport aux épaules. Grâce à ces voies, la tête est maintenue dans une position déterminée même lorsque le corps se déplace dans l'espace. Parce que le faisceau vestibulo-spinal a pour origine les noyaux vestibulaires (ou noyaux de Deiters), ils transmettent les informations provenant du système labyrinthique de l'oreille interne, organe qui détermine la position de la tête et du cervelet. Ils permettent donc l'orientation de la tête en réponse à des

nouveaux stimuli. Le faisceau tectospinal prend son origine du collicule supérieur du mésencéphale (tectum) qui reçoit des informations directes de la rétine, mais aussi des informations somatosensorielles et auditives. À partir de la représentation de l'environnement que forme le collicule supérieur, cette voie contribue à l'orientation du regard.

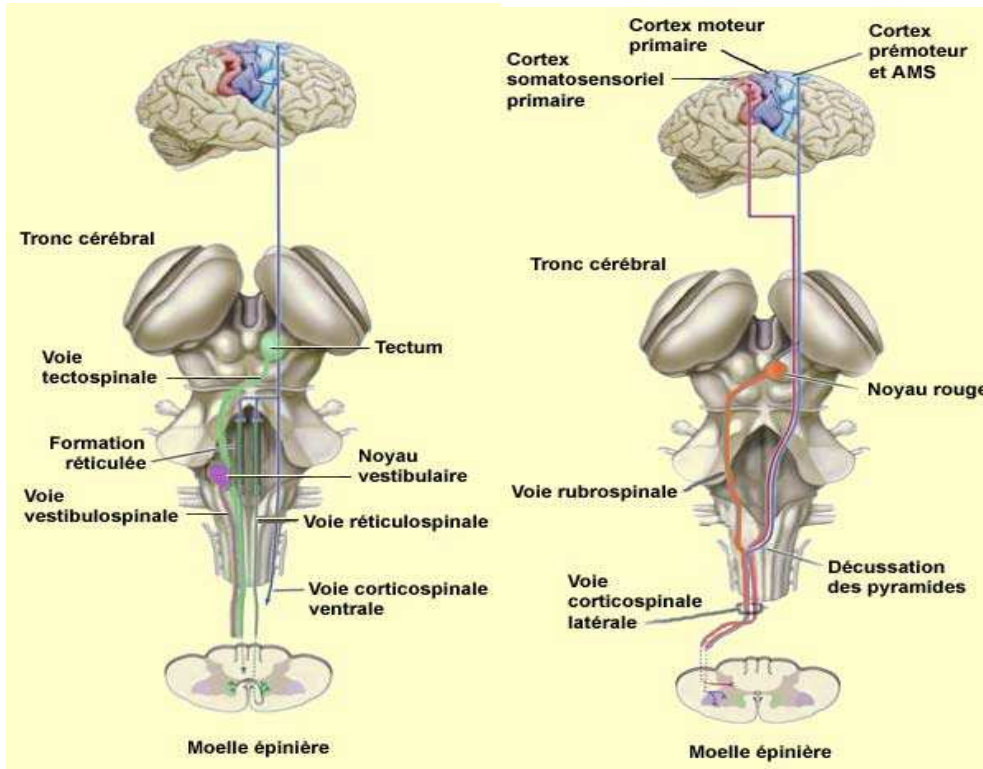


Figure II-1: Les systèmes descendants médian et latéral issus du tronc cérébral.

Trois voies descendantes issues du tronc cérébral permettent de contrôler la posture et le tonus musculaire a) Les voies médianes sont composées de la voie réticulospinale et vestibulospinale contrôlant la musculature axiale et proximale, et b) la voie rubrospinale qui rejoint la voie corticospinale formant la voie latérale.

Les faisceaux réticulo-spinaux d'origine pontique et bulbaire prennent leur origine au niveau de la formation réticulée dans le tronc cérébral. Le faisceau réticulospinal pontique exerce une action facilitatrice sur les muscles dits anti-gravitaires. L'action de ces voies contribue au maintien de la posture, les axones d'origine pontique favorisant les réflexes antigravitaires spinaux et les axones d'origine bulbaire libérant au contraire les muscles qui s'opposent à la gravité, facilitant ainsi d'autres mouvements. Elles jouent donc un rôle important dans la modulation des réflexes posturaux.

La voie rubro-spinale est une voie phylogénétiquement ancienne. Au cours de l'évolution des primates, on observe justement une diminution de cette voie indirecte au profit

d'une prise en charge cortico-spinale de plus en plus importante du contrôle moteur. Elle représente le second faisceau du système latéral. Ce faisceau provient des neurones du noyau rouge situé dans le mésencéphale. Ce noyau reçoit des informations du cortex frontal, une région qui contribue déjà massivement à la voie cortico-spinale. Elle a une action excitatrice sur les motoneurones des muscles fléchisseurs et une action inhibitrice sur les muscles extenseurs controlatéraux. Elle laisse penser qu'elle ne remplit plus la même fonction bien qu'elle soit encore largement méconnue.

2. DEFINITION DE LA POSTURE

Une posture ou attitude posturale a été définie par la position globale de l'ensemble des segments corporels à un instant donné (Thomas, 1940 ; Paillard, 1976). Elle est constituée par un grand nombre de modules articulés entre eux et chaque segment corporel peut adopter une multitude de configurations dans les limites permises par la mécanique articulaire les liant. Ainsi, l'homme peut adopter une infinité de configurations segmentaires dans les limites imposées par la physique et la biomécanique (degré de liberté articulaire, ligaments, contraintes d'équilibre... etc.). En ce sens, la contrainte d'équilibre préside largement au choix des différentes postures adoptées, aussi bien en position statique qu'en position dynamique puisque la posture ne peut être maintenue si les conditions d'équilibre ne sont pas respectées. Ainsi, la définition précédente semble clairement insuffisante. Selon Gahéry (1987), la posture peut-être définie de manière très générale³: « *Les relations mécaniques générales entre les différents segments corporels, aussi bien en condition statique (confrontées à la force de gravité et aux contraintes anatomiques) que dynamique où d'autres forces et nécessités sont ajoutées* ». Cette citation englobe à la fois la notion de posture définie précédemment comme une configuration géométrique (c'est-à-dire, position des différents segments entre eux), mais aussi la notion du maintien de l'équilibre dans des situations statiques et dynamiques. En somme, la posture renvoie à une configuration géométrique des segments corporels les uns par rapport aux autres mais inclut également l'adéquation de ces positions avec la conservation de l'équilibre.

Dés lors, il est nécessaire de mettre en place un contrôle postural actif, correspondant à l'ensemble des mécanismes permettant d'assurer une posture adaptée à l'action entreprise.

³ « ...the general mechanical relationships between the different part of the body, both in static conditions (facing the force of gravity and anatomical constraints) and in dynamic conditions where other forces and necessities are added » Gahéry, 1987, p 348.

Cette notion de contrôle amène donc un questionnement sur sa fonction ainsi que son fonctionnement.

2.1. Fonctions du contrôle postural

Il a été proposé que le contrôle postural assure deux fonctions essentielles et distinctes (Paillard, 1971 ; Massion, 1992). Le maintien de la posture ne peut se concevoir que si le système considéré répond aux lois de la mécanique sous jacentes à la notion l'équilibre. C'est-à-dire que la projection du Centre de Gravité (CG)⁴ total du corps sur le sol se trouve à l'intérieur de la surface de sustentation (voir Massion, 1994, 1998 pour une revue de littérature ; Nashner, 1985). Le CG est le barycentre des centres de gravité des segments corporels. Cette base de sustentation est alors définie par la surface de contact des deux pieds au sol ainsi que l'espace les séparant. Les termes de contrôle postural ou de contrôle de l'équilibre sont utilisés pour expliciter la façon de maintenir la position d'équilibre ou de rétablir une position d'équilibre en réponse à une perturbation (rester dans la position initiale ou initier un pas). Les critères de maintien d'équilibre sont alors différents lorsqu'il s'agit de rester debout, et lorsqu'il s'agit de ne bouger qu'un segment du corps ou de déplacer le corps entier, respectivement un pas vers l'avant ou la marche. Le contrôle de l'équilibre peut alors se diviser en un équilibre dit quasi-statique (CG en oscillation) et un équilibre dynamique (déplacement du CG). La première fonction principale est alors de s'opposer à la force de gravité afin de maintenir une posture bipédique. Elle consiste, d'une part, à réguler la raideur des différentes articulations, grâce à l'activation sélective des muscles, pour résister à l'action de la gravité et ainsi lutter contre les forces résultantes de réaction du sol et, d'autre part, à maintenir l'équilibre. Maintenir une position érigée stable est alors obtenu en maintenant un tonus musculaire (au niveau des muscles extenseurs des membres) et en régulant la contraction de certains muscles antagonistes aux muscles antigravitaires (à l'aide de co-contractions) pour stabiliser les articulations. Ceci permet d'avoir une action efficace sur le centre des pressions (CP)⁵ et de préserver l'équilibre consistant en un maintien de la projection du centre de masse du corps à l'intérieur de la base de sustentation. La seconde fonction du contrôle postural assure l'interface avec le monde extérieur afin d'organiser l'action dans l'environnement. Dans ce cadre, la posture peut se stabiliser en plusieurs sous-ensembles pour répondre à certaines fonctions. Par

⁴ Le CG est le barycentre des centres de gravité des segments corporels.

⁵ Le CP correspond au point d'application de la résultante des forces de réactions au sol, c'est-à-dire le barycentre des composantes verticales des forces de réaction au sol, réparties sur l'ensemble de la surface de contact des pieds. Le contrôle des déplacements du CG à l'intérieur de la base de sustentation (représentant la performance nette) se ferait via les déplacements du CP dont les amplitudes d'oscillations sont plus grandes que celles du CG (Winter et al., 1996).

exemple, la lecture d'un journal en marchant nécessite une rigidité accrue des bras et du tronc pour former un seul bloc solidaire. Ce sous-ensemble est alors régulé de manière autonome par rapport aux segments inférieurs (Droulez, 1988).

2.2. Fonctionnement du contrôle postural

Dans un contrôle postural statique, la référence stabilisée est généralement la projection au sol du CG. Cette projection au sol est contrôlée centralement à l'aide d'informations afférentes d'origine labyrinthique, visuelle et proprioceptive qui, agissant comme des signaux détecteurs d'erreurs provoquent la correction appropriée (Dichgans et Brandt, 1978 ; Gurfinkel et al., 1988 ; Roll et Roll, 1988). Grâce à ces signaux, le maintien d'une position de référence est réalisé par l'intermédiaire des réactions posturales (Massion et Viallet, 1990). Elles sont organisées par deux types de boucles fonctionnant à partir de ces signaux détecteurs d'erreurs. La première est de type continu et corrige en permanence la posture en fonction des messages d'erreurs (cela renvoie à la notion de boucle fermée). Ce mode est relativement lent puisqu'un temps relativement long s'écoule entre le début du message d'erreur et la correction associée. Il ne fonctionne correctement que pour des oscillations corporelles inférieures à 0.5 Hz.

Le second mode est discontinu. Le message d'entrée déclenche une réaction posturale phasique. Par exemple, une perturbation de la plate-forme de force déclenche une synergie posturale stéréotypée après 50-100 ms (Nashner et MacCollum, 1985).

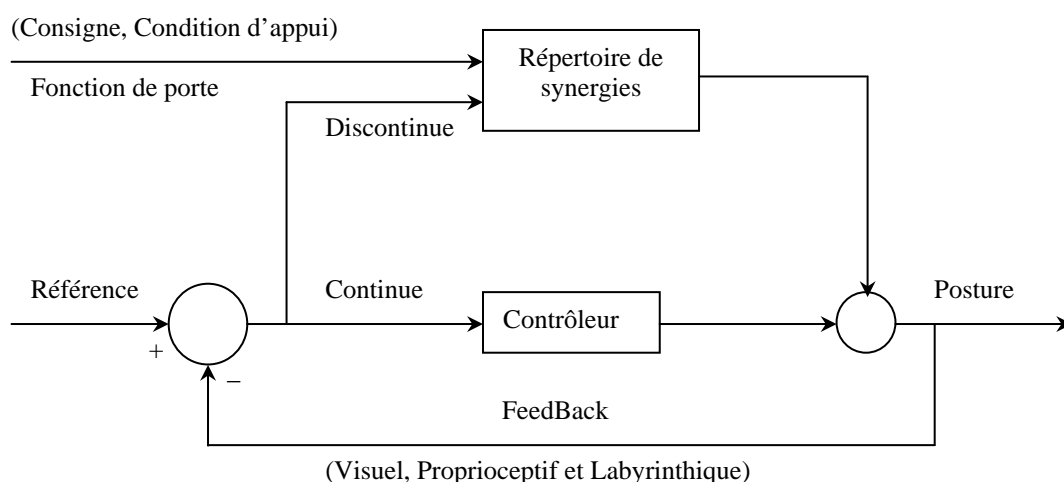


Figure II-2 : Contrôle de la posture.

Ce contrôle s'effectue par deux boucles de rétroaction continue et discontinue. Trois sources d'afférences contribuent à la régulation de la posture en mesurant les écarts par rapport à la

valeur de référence correspondant généralement à la position du CG par rapport au sol. Cette valeur peut-être modifiée par consigne comme par exemple lors du maintien par le sujet d'un verre rempli de liquide. Des entrées exerçant une fonction de porte présélectionnent les réactions posturales en fonction de la consigne et des conditions d'appui (d'après Massion et Dufossé, 1988).

Ces auteurs suggèrent qu'il existe un répertoire de réactions stéréotypées d'origine génétique. Ainsi, les séquences de commandes musculaires seraient caractérisées pour chaque mode de perturbation. Ces synergies seraient du même type que celles décrites dans certains automatismes comme par exemple la locomotion.

Le fonctionnement continu fait directement référence au maintien de l'équilibre orthostatique quasi-statique. Il est très rare, ou alors de manière transitoire, que les conditions strictes d'équilibre statique mécanique soient remplies chez l'homme lors de la station debout (King et Zatsiorsky, 1997). Cela impliquerait que la projection du CG et le centre des pressions (CP) soient alignés. Dès lors, nous parlons d'oscillations posturales, le CP oscillant de part et d'autre des oscillations du CG. Pour mieux comprendre ce phénomène, la modélisation du contrôle postural en pendule inversé nous permet de dissocier 5 grandes étapes (cf figure II-3).

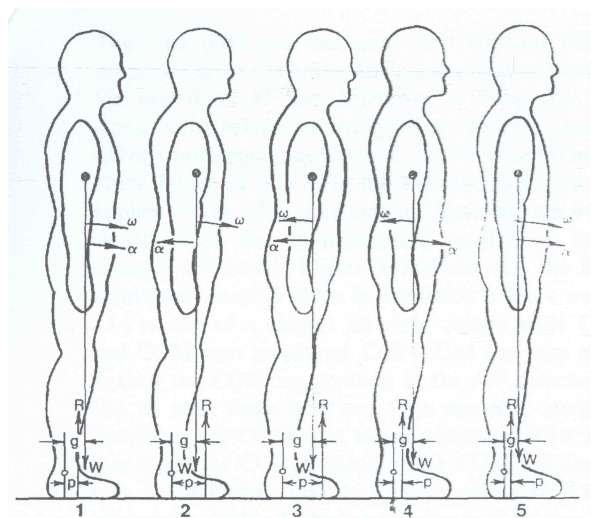


Figure II-3 : Etapes du modèle simplifié du pendule inversé (d'après Winter, 1995).

- Le premier temps correspond à la position du CG en avant par rapport au CP, la vitesse angulaire ω étant dans le sens horaire (c'est-à-dire, condition similaire à une chute en avant). Le poids du sujet W est égal et opposé à la force de réaction verticale R et agissent à une distance respective g et p de l'articulation de la cheville. W et R restent constants durant le maintien orthostatique. Modélisant le corps comme un

pendule inversé pivotant autour de la cheville, un moment dans le sens anti-horaire égal à Rp et un moment dans le sens horaire égal à Wg agissent :

$$Rp - Wg = I\alpha \quad \text{Équation 1}$$

Où : I est le moment d'inertie total du corps au niveau de la cheville (kg.m^2)
 α est l'accélération angulaire du pendule inversé (rad.s^{-2})

- Si $Wg > Rp$, le corps subit une accélération angulaire dans le sens horaire. Afin de corriger cette bascule vers l'avant, le sujet augmente le déplacement du CP en réalisant une flexion plantaire jusqu'au moment où le CP devance le CG, ce qui correspond au temps 2. Maintenant que $Rp > Wg$, α change de sens et devient anti-horaire et commence à diminuer la vitesse angulaire ω .
- Au temps 3, l'accélération angulaire α , dans le sens anti-horaire, inverse le sens de la vitesse angulaire ω et devient anti-horaire, le corps réalise donc une bascule vers l'arrière.
- Lorsque le SNC détecte le besoin d'une correction du déplacement postérieur du CG, le CP diminue par l'action d'une flexion dorsale de la cheville et vient se positionner en arrière du CG. A ce moment, l'accélération angulaire α change de sens et redevient horaire au temps 4, freinant ainsi la vitesse angulaire ω anti-horaire, la faisant revenir dans le sens horaire. Le corps retrouve ainsi sa configuration initiale au temps 5.

Il est donc apparent que les oscillations du CP sont supérieures aux oscillations du CG et doivent continuellement basculer de part et d'autre de la position du CG. Par conséquent, lorsque la projection du CG se situe à la limite de la base de sustentation, c'est-à-dire, au niveau des orteils ou du talon, il est possible que la position du CP ne puisse créer suffisamment de moment pour inverser le sens de la vitesse angulaire ω . Le sujet doit donc déployer une synergie posturale, c'est-à-dire, bouger un membre inférieur pour éviter de tomber. Nous nous retrouvons alors dans le second mode de contrôle de la posture dit discontinu.

2.3. Posture et coût attentionnel

Ces dernières années ont vu apparaître une thématique faisant émerger l'influence des processus cognitifs et attentionnels sur le contrôle postural. Longtemps considéré comme un processus automatique, il semble néanmoins que l'activité du contrôle postural statique posséderait un coût en termes de ressources attentionnelles. Ce coût attentionnel a été mis en évidence dans des protocoles de double tâche. Le principe consiste en deux phases : quantifier la performance d'une tâche dite primaire puis exécuter une deuxième tâche dite secondaire pendant l'exécution de la tâche primaire sans que la performance de cette dernière soit diminuée. Grâce à ce procédé, nous sommes en mesure de calculer la demande attentionnelle d'une tâche par rapport à une autre. Cette procédure repose sur trois hypothèses : 1) il existe une quantité de ressources attentionnelles limitée, 2) exécuter une tâche requière l'allocation d'une partie de ces ressources, et 3) si le traitement simultané de deux tâches dépasse notre quantité de ressources attentionnelles, la performance de l'une ou de l'autre des deux peut se dégrader. En considérant la régulation de la posture comme une tâche à part entière, il nous est donc possible de démontrer que les mécanismes de la régulation de la posture interagissent avec des systèmes cognitifs de haut niveau et partagent des ressources attentionnelles semblables (Lajoie et al., 1993 ; Teasdale et al., 1993 ; Lajoie et al., 1996 ; Redfern et al., 2001 ; Yardley et al., 2001 ; Woolacott et Shumway-Cook, 2002 pour une revue de littérature). En ce sens, les travaux de Vuillerme et Nougier (2004) montrent une augmentation du TR (tâche secondaire) en relation avec la difficulté du maintien de la posture (tâche primaire : assis, debout, maintien unipodal et maintien unipodal sur un support instable). Ce résultat prouve bien l'existence d'un coût attentionnel du maintien postural. Par conséquent, le contrôle postural est non plus considéré comme une réponse de type réflexe basée sur les stimuli sensoriels mais plutôt comme une activité perceptivo-motrice. L'influence attentionnelle du contrôle postural maintenant l'équilibre du corps peut donc intervenir au niveau de trois étapes décrites dans les modèles du contrôle moteur : l'identification des informations sensorielles (c'est-à-dire, sensation de la position du corps et du mouvement grâce aux informations visuelles, proprioceptives et labyrinthique), leur intégration en vue de déterminer l'orientation du corps et du mouvement et la sélection de la réponse ramenant le corps dans un état d'équilibre postural (Vuillerme et Nougier, 2004).

Ces résultats récents mettent en évidence l'utilité de s'intéresser aux processus cognitifs impliqués dans la coordination entre la posture et le mouvement. Comme nous allons le voir, l'exécution d'un mouvement en posture bipédique peut avoir des incidences sur le

maintien postural qu'il faut prévoir afin de conserver son équilibre. Les processus de préparation à l'action permettent cette prévision ou anticipation.

3. COORDINATION POSTURE-MOUEMENT

C'est sur la base de ce contrôle postural que vient s'exécuter le mouvement volontaire. Selon Hess, (1943, citée par Massion, 1992), l'activité motrice intentionnelle est formée de deux composantes : l'une correspond au déplacement d'un ou de plusieurs segments vers un but, appelé « mouvement focal » (composante téléocinétique). La deuxième composante correspond au support assuré par le reste du corps au segment mobilisé (composante éreismatique). Par exemple, lors de la mobilisation du bras chez le sujet debout, le tronc sert de support au mouvement focal : il subit des forces de réaction associées à l'exécution du mouvement. Ces deux composantes renvoient donc à deux systèmes de contrôle différents : un relatif au contrôle du mouvement, l'autre relatif à celui de la posture. Lors de vols paraboliques (période de 20 s) ou de vols orbitaux (période prolongée), le corps, placé à l'intérieur de l'habitacle, n'est soumis à aucune contrainte d'équilibre et se trouve en état de quasi-apesanteur. Ceci a permis d'isoler le contrôle postural relevant du maintien de l'équilibre lors d'actes moteurs nécessitant de déplacer d'un ou de plusieurs segments corporels. Lors d'un mouvement latéral de jambe (Mouchnino et al., 1996 ; Pedrocchi et al., 2002) ainsi que d'une inclinaison du tronc vers l'avant (Vernazza-Martin et al., 2000), l'absence de contraintes d'équilibre n'influence pas l'exécution du mouvement focal. Ces résultats suggèrent une dissociation entre les commandes motrices liées au maintien de la posture et celles liées au déplacement des segments. Cette dichotomie du comportement moteur en composante focale et posturale est confortée grâce à ces expériences en microgravité. Il est donc nécessaire de coordonner ces deux systèmes afin d'assurer leur efficacité conjuguée. L'objectif de cette coordination consiste à conserver l'équilibre en cours de mouvement. Ainsi, l'apparition d'ajustements posturaux est le reflet de cette coordination entre la posture, l'équilibre et le mouvement. Ces ajustements posturaux correspondent à des mouvements n'ayant pas de lien direct avec le mouvement focal. Ils concernent les segments voisins et les segments éloignés de la chaîne focale (c'est-à-dire, la chaîne posturale).

Il existe deux raisons principales pour lesquelles le mouvement peut perturber la posture. Premièrement, le déplacement de segments corporels modifie la répartition des masses. Ainsi, le barycentre des masses que représente le CG s'en trouve modifié. Il en résulte un déséquilibre qui doit être compensé par le déplacement d'autres segments

corporels. Le maintien de l'équilibre s'effectue au détriment de celui de la posture. De plus, d'après la troisième loi de Newton⁶, les forces liées au déplacement volontaire d'un segment comme le bras sont accompagnées de force de réaction sur les segments qui servent de support à l'action (c'est-à-dire, tronc, jambes). Les ajustements posturaux observés ont pour finalité de minimiser les déplacements posturaux. La stabilisation de la posture est de ce fait très importante puisqu'elle sert de base de référence au calcul des trajectoires dans l'espace péri-corporel.

3.1. Ajustements posturaux

D'une manière générale, plusieurs formes d'ajustements posturaux peuvent être identifiés et des classifications multiples sont possibles. Une des classifications des plus intéressantes est celle proposée par Gahéry (1987) selon laquelle ces ajustements peuvent se différencier en fonction de leur chronologie d'apparition, i.e., en fonction de la date d'apparition par rapport aux perturbations imposées au système (cf. Figure II-4).

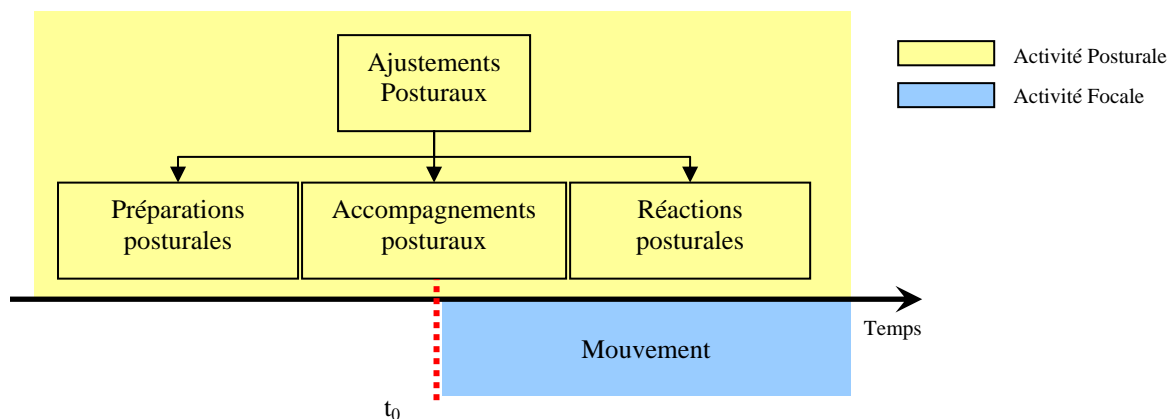


Figure II-4 : Classification des ajustements posturaux.

Ces ajustements posturaux peuvent être dissociés en trois catégories en fonction de la date d'apparition du mouvement (t_0). Ce type de classification conduit à dichotomiser le comportement global du sujet en une activité posturale et focale. Cette dernière est définie par la mobilisation de segments de la chaîne focale, autrement dit, le mouvement orienté vers un but.

Les réactions posturales représentent la catégorie d'ajustements posturaux la plus étudiée et la plus facilement identifiable. Elles surviennent en réponse à une perturbation

⁶ Lorsqu'un solide S_1 exerce une force sur un solide S_2 , le solide S_2 exerce sur le solide S_1 , la force directement opposée.

soudaine et imprévue de la posture. Elles apparaissent en rétroaction, en réponse à la sollicitation des récepteurs sensoriels lors de la perturbation posturale et permettent un retour du système à sa position initiale d'équilibre. Elles sont donc postérieures à l'événement perturbateur. Fonctionnant sur le principe d'un système en boucle fermée (cf. Figure I-4, page 10), ces réactions posturales interviennent après un délai de traitement et donc peuvent parfois être insuffisantes pour réaliser un retour à l'équilibre. Tout comme les différents modes de contrôle du mouvement, d'autres mécanismes sont mis en place afin de palier à ce délai de traitement des rétroactions sensorielles.

La deuxième catégorie correspond aux accompagnements posturaux survenant de façon simultanée avec l'apparition du mouvement. Un des comportements caractéristiques mettant en place des accompagnements posturaux est la synergie posturale décrite par Babinski (1899). Lors d'une bascule du tronc vers l'arrière, on observe au même instant une extension des hanches ainsi qu'une flexion des genoux destinés à maintenir la projection du centre de gravité à l'intérieur du polygone de sustentation. Babinski avait décrit, chez les patients cérébelleux, une disparition de cette flexion du genou entraînant une incapacité à se maintenir debout lors du mouvement du tronc vers l'arrière. Ces compensations permettent de maintenir la position du CG pratiquement à la même place durant la réalisation du mouvement (Crenna et al., 1987).

Enfin, les ajustements préparatoires sont présents avant l'apparition du mouvement et conditionnent souvent sa réalisation. Ils sont ainsi plus communément appelés Ajustements Posturaux Anticipés (APAs). Ces préparations posturales ont été identifiées au niveau des jambes et du tronc lors de mouvements d'élévation d'un membre supérieur (Belenkiy et al., 1967 ; Bouisset et Zattara, 1981 ; Horak et al., 1984 ; Bouisset et Zattara, 1987 ; Friedly et al., 1988). Il faut cependant noter que la limite entre ces deux derniers ajustements est difficile à établir.

Notons que cette classification a été obtenue grâce à l'utilisation de ce paradigme permettant une dichotomie entre l'activité posturale de l'activité focale, c'est-à-dire, les mouvements issus de la chaîne posturale (le tronc et les jambes) et le mouvement orienté vers un but (le bras). En dehors d'un mouvement d'élévation de bras qui présente cet avantage, cette dichotomie est plus difficile à distinguer, notamment dans le cas d'un mouvement de jambe ou d'un pointage manuel en dehors de la zone de préhension. En effet, un mouvement de jambe amène un transfert de poids vers la jambe d'appui avant son élévation, afin de repositionner la projection du CG à l'intérieur de la future base de sustentation (Mouchnino et

al., 1991, 1992, 1993). Sans ce transfert de poids, l'action orientée vers le but, c'est-à-dire, l'élévation de la jambe, ne peut se faire. De même, la réalisation d'un pointage manuel au delà de la zone de préhension nécessite une bascule vers l'avant du tronc avant la mobilisation du bras vers la cible à atteindre (Bonnetblanc et al., 2004). L'activité posturale étant nécessaire et indissociable au bon déroulement de l'action, il est donc difficile de déterminer à quel moment l'activité focale débute.

4. CAS PARTICULIER : APAS

Notre travail porte sur cette dernière catégorie d'ajustements posturaux. Leur nature anticipée leur confère un statut particulier en terme de contrôle moteur. En effet, le fait qu'ils apparaissent avant le début du mouvement montre qu'ils ne peuvent pas être déclenchés de manière réflexe via des signaux afférents induits par le mouvement volontaire (Massion, 1992). Rappelons qu'un délai temporel incompressible est présent entre l'apparition du mouvement et les possibles rétroactions imputables au traitement de ces réafférences sensorielles via le SNC. Par conséquent, si l'on accepte cette notion d'anticipation, la définition des APAs ne peut se résumer à la notion de préparations posturales, elle peut être étendue aux événements posturaux concomitants à l'apparition du mouvement. Les caractéristiques communes de ces ajustements posturaux concernent alors leur lien avec le mouvement volontaire ainsi que les mécanismes permettant leur programmation, c'est-à-dire, le mécanisme proactif. Dans ce contexte, nous ne retiendrons que deux types d'ajustements posturaux : d'une part les réactions posturales mises en place grâce à un mécanisme rétroactif en réponse à une perturbation imprévue et les APAs déclenchés grâce à un mécanisme proactif (commande Feedforward) et associé au mouvement volontaire, c'est-à-dire correspondant à une perturbation en partie prévisible de la posture.

4.1. Fonctions des APAs

La fonction des APAs dépend de la tâche à effectuer par le sujet. Cependant, trois fonctions principales peuvent leur être attribuées : une fonction de compensation des perturbations dues au mouvement focal, une fonction de modification des conditions d'appui et enfin une fonction d'optimisation du mouvement.

4.1.1. Compensation des perturbations dues au mouvement

Lors de la réalisation d'un mouvement, les perturbations posturales qu'occasionnent la réalisation du mouvement sont de deux natures : d'une part, le mouvement modifie la position du CG et d'autre part, les forces internes qui permettent de générer le mouvement ont un effet déstabilisateur sur les segments issus de la chaîne posturale. Examinons dans un premier temps comment les APAs compensent les déplacements du CG occasionnés par l'exécution du mouvement.

4.1.1.1. Compensation des déplacements du CG

Ce rôle de compensation des minimisations des déplacements du CG a été mis en évidence lors d'une tâche d'inclinaison du tronc (Thorstensson et al., 1985). Ces mouvements sont accompagnés d'une activité posturale au niveau des jambes (Tibialis anterior, Soleus, Vastus medialis, biceps femoris,... etc.) qui apparaît avant le début du mouvement. Sans ces APAs, le déplacement du CG serait d'environ 12 cm vers l'avant lors d'une inclinaison du tronc de 30 cm vers l'avant (Crenna et al., 1987). Le déplacement n'étant que de 2 cm, Crenna et al. ont proposé que la fonction des APAs serait de minimiser les déplacements du CG. Cependant, cette étude ne tient pas compte des interactions mécaniques (c'est-à-dire, les forces internes) qui existent entre ces différents segments corporels. Il est néanmoins possible d'évaluer ces interactions par le biais de la simulation informatique. Grâce à cette méthode, Ramos et Stark (1990) ont montré que le déplacement « naturel » du CG était biphasique : ils ont observé un déplacement du CG vers l'avant de 9 cm puis un déplacement vers l'arrière avant d'aboutir à la chute si aucun contrôle n'est appliqué. De même, l'ajout d'un contrôle rétroactif au niveau des chevilles conduit également à la chute. Ces résultats mettent en évidence qu'un fonctionnement basé sur le mode rétroactif est insuffisant pour conserver l'équilibre du corps. Selon ces auteurs, le contrôle postural pourrait s'articuler autour de deux processus : 1) activer les déplacements passifs des membres inférieurs avant le début du mouvement afin de minimiser les déplacements du CG vers l'avant, et 2) activer les muscles antérieurs (antagonistes des muscles posturaux) des membres inférieurs afin d'arrêter ce mouvement. Ce même type de mouvement a été étudié en condition de normogravité et microgravité lors de vols paraboliques successifs (Vernazza-Martin et al., 2000). Dans ce contexte, une analyse en composante principale de la synergie cinématique de l'inclinaison du buste vers l'avant (angles de la cheville, genou et de la hanche) a mis en évidence deux phénomènes : 1) les déplacements du CG restent minimisés lors de la réalisation de

l'inclinaison du buste en condition de microgravité, c'est-à-dire, en dépit de l'absence de contrainte d'équilibre, et 2) le couplage entre les articulations de la cheville, du genou et de la hanche, responsable de la minimisation des déplacements du CG et mis en évidence par l'analyse en composante principale reste très important en condition de microgravité.

D'autres mouvements ont été utilisés pour mettre en évidence cette minimisation des déplacements du CG grâce aux APAs. Lors d'un mouvement de préhension ou d'élévation d'une charge au sol (Toussaint et al., 1998), l'ajout de cette masse déplace le CG vers l'avant. Pour compenser ce déplacement, le système nerveux central met en place des APAs générant un moment horizontal vers l'arrière, une force propulsive horizontale vers l'arrière, et un déplacement du CP vers l'avant. Ce déplacement du CP vers l'avant permet de faire basculer le CG vers l'arrière, ramenant ainsi ce dernier dans la base de sustentation. Enfin, selon les travaux de Martin (1967), l'élévation d'un bras à l'horizontale s'accompagne d'une légère bascule du tronc vers l'arrière permettant de compenser le déplacement du CG vers l'avant associé au déplacement du bras vers l'avant.

Les travaux de Hay et Redon (1999) portant sur le délestage d'une charge au niveau des bras mettent en évidence ce rôle de compensation des déplacements du CG par la commande en Feedforward (permettant de créer les APAs). Ces résultats montrent un déplacement du CP vers l'arrière avant l'initiation du délestage. Cette anticipation du déplacement du CP par rapport au CG augmente donc le bras de levier du moment (cf fonctionnement du contrôle postural) permettant de freiner la vitesse angulaire du corps et l'inverser. Lors du délestage créé par l'expérimentateur, cette commande en Feedforward n'est pas générée, nous n'observons aucun déplacement anticipé du CP par rapport au CG. Le CP doit alors se déplacer plus en arrière afin de générer suffisamment de moment pour freiner la vitesse angulaire du corps. Les résultats issus d'un protocole de délestage en condition de perturbation externe (c'est-à-dire, créée par l'expérimentateur) montrent en effet un déplacement du CP arrière plus important qu'en condition auto-initiée (Aruin et Latash, 1995b ; Hay et Redon, 2003), même lorsque le sujet connaît le moment d'apparition du délestage (Brown et al., 2003 ; Aruin et al., 2003). Ce déplacement anticipé du CP est dû à un réajustement de l'activité posturale au niveau du dos et des jambes au moment de l'initiation du délestage, se caractérisant par une diminution de l'activité musculaire des Erector Spinae (ES), des Biceps Femoris (BF) et des soleus (SOL) avant l'apparition du délestage. Ce mouvement de délestage, qu'il soit effectué en position assise ou bipodale s'accompagne également d'un déplacement angulaire des bras vers le haut si aucun contrôle en Feedforward

n'est adopté. En condition de perturbation auto-initiée, on assiste à une diminution de l'activité musculaire du bras supportant la charge en coordination avec l'activité de la main controlatérale initialisant le délestage (Hugon et al., 1982 ; Dufossé et al., 1985). Nous observons cette même diminution de l'activité du Deltoidus Anterior (DA) lors d'un délestage par une légère abduction des bras (Aruin et Latash, 1995b). Dans les deux cas, la commande posturale agit pour minimiser les effets de la perturbation induite par le délestage en condition auto-initiée. Ce rôle n'apparaît pas en condition de perturbation externe car la réponse posturale est associée exclusivement à la commande en Feedback qui agit dans les dernières phases de l'action, ce qui laisse plus de temps à la perturbation posturale de prendre effet avant cette correction. Il s'en suit donc un plus grand déplacement du CP vers l'arrière avec un mouvement des bras vers le haut.

4.1.1.2. Compensation des forces internes

Le mouvement est issu de forces internes résultant de la contraction musculaire. Lors de l'élévation d'un bras, ces forces sont appliquées au niveau de l'épaule et ont une force résultante dirigée vers l'arrière et vers le bas. D'un point de vue purement mécanique, cette force devrait provoquer une accélération du CG vers l'arrière et vers le bas si elle n'est pas compensée par des ajustements posturaux. Grâce à l'analyse des accélérations au niveau de multiples segments posturaux, ces auteurs ont montré que les forces générées par les APAs sont dirigées dans la direction opposée aux forces de réactions et par conséquent servent à minimiser la perturbation posturale issue du mouvement (Bouisset et Zattara, 1987a, 1987b, 1988). En conséquence, le signe de la variable biomécanique anticipée est opposé au signe de la variable biomécanique qui est déterminée par la perturbation associée au mouvement volontaire. Lee et al., (1987) observent une augmentation de ces forces de réaction avec la vitesse d'élévation du bras car elles ont besoin d'une plus grande accélération pour surmonter l'inertie du segment mobilisé.

En analysant le moment de torsion T_z , représentant le moment M_z autour de l'axe vertical corrigé par les termes yF_x et xF_y (x et y représentent respectivement la position du CP au niveau des axes antéro-postérieur et médio-latéral, F_x et F_y étant les forces de réaction au sol selon ces mêmes axes), Bleuse et al. (2002) ont montré l'importance de cette compensation des forces internes. En comparant une élévation de bras exécutée par le sujet avec une élévation passive du bras exécutée par un expérimentateur, ces auteurs ont montré que les phases du moment de torsion différaient. Le moment de torsion présentait deux phases

lors du mouvement volontaire et n'en présentait qu'une lors de la mobilisation passive. Un mouvement asymétrique tel que l'élévation du bras droit entraîne sur le haut du tronc un mouvement de torsion (anti-horaire, vue de dessus) se répercutant en raison du principe d'action et de réaction sur tous les segments corporels, pour provoquer en bout de chaîne une modification de la réaction exercée par le sujet sur la plate-forme de force. Ce phénomène se traduit par l'apparition d'une déviation négative du moment de torsion T_z , correspondant au déplacement segmentaire et constitue une réaction mécanique à celle-ci. Cette déviation est précédée par une phase positive qui apparaît avant l'initiation du mouvement. Elle est donc le reflet de la préparation posturale. Lors de la mobilisation passive du bras par l'expérimentateur, cette première phase positive est absente suggérant fortement la mise en jeu de forces internes lors de la mobilisation active du bras par le sujet. Ce moment de Torsion T_z représente une variable très intéressante dans la mesure où elle présente deux phases très distinctes lors de l'élévation d'un bras à l'horizontale.

4.1.2. Modification des conditions d'appui

La seconde fonction des APAs a été mise en exergue grâce aux mouvements des membres inférieurs. Ce type de mouvement représente une caractéristique singulière par rapport aux autres types de mouvement. En effet, dans ce type de tâche, le membre inférieur joue un double rôle : celui de participer au maintien orthostatique et celui de participer à l'exécution du mouvement. En conséquence, la réalisation de ce type de mouvement nécessite au préalable une modification de la base de sustentation avant le début du mouvement. Ces changements posturaux ont été décrits pour la première fois par Ioffé et Andreyev (1969 cité par Massion, 1992) chez le chien. Lorsqu'une patte est délestée, une stratégie diagonale se met en place. Cette stratégie se caractérise par une décharge de l'appui appartenant à la diagonale du segment mobilisé et un renforcement des appuis appartenant à l'autre diagonale. Une telle organisation a été observée chez l'homme en position de quadrupédie horizontale (Gélat et al., 1996). Cependant, une autre stratégie a été mise en évidence en position de quadrupédie verticale. Le délestage du pied droit entraînerait une diminution de la force verticale appliquée par la main droite mais une augmentation de la contribution du pied et de la main gauche (Noé et Quaine, 2001). Cette stratégie a pour effet de conserver une position identique du CG lors du passage de quatre appuis à trois appuis.

4.1.3. Optimisation du mouvement

Plusieurs études antérieures examinant la relation entre posture et mouvement ont conclu que le but principal des APA est de compenser les effets déstabilisants dus à la perturbation provoquée par un mouvement du bras à venir (Belenkiy et al., 1967; Lee, 1980; Bouisset et Zattara, 1981; Horak et al., 1984; Bouisset et Zattara, 1987; Lee et al., 1987; Riach et Hayes, 1987; Friedli et al., 1988; Eng et al., 1992). Kaminski et Simpkins (2001) ont suggéré qu'il n'y a pas de bénéfice direct à incorporer le mouvement du corps dans le transport de la main lorsque la tâche nécessite une interaction minimale avec l'environnement. Les APAs peuvent être alors utilisés exclusivement pour la stabilisation posturale. Cette hypothèse est supportée par le fait que les APAs associés à un mouvement d'élévation du bras étaient uniquement présents lorsque la vitesse du mouvement était suffisamment importante pour perturber la stabilité posturale (Bouisset and Zattara 1987; Horak et Nashner, 1986; Lee et al. 1987).

A l'inverse, quand une tâche nécessite plus qu'une simple élévation du bras, les fonctions des APAs s'étendent au delà de la stabilisation posturale. Par exemple, Stapley et al. (1998), Martin et al. (2000) et Kaminski et al. (2001) dans une tâche analogue ou il s'agissait de saisir un objet ou de pointer en dehors de la zone de préhension, ont montré que les APAs servaient à initier et à faciliter le mouvement d'atteinte. De la même manière, quand une tâche nécessite de tirer sur une poignée fixe, Lee et al. (1990) ont conclu que les APAs ne stabilisaient pas simplement le corps, mais étaient utilisés pour augmenter la force du tirage. Les travaux de Le Bozec et al. (2001) confirment ce rôle dans cette position assise, lors d'une tâche de poussée maximale isométrique sur une barre. L'effort de poussée requiert une augmentation monotone de l'activité électromyographique des muscles focaux mais aussi posturaux. La séquence d'activation est ascendante. Elle débute par les muscles posturaux (les muscles croisant l'articulation de la cheville) et finit par les muscles focaux, notamment au niveau du poignet (Flexor Carpi Ulnaris). Le mouvement observé du CP vers l'arrière résulterait d'un mouvement de rotation du pelvis dans le même sens, augmentant ainsi la dynamique du corps mis en évidence par la résultante de la force horizontale au niveau de la plate-forme de force. Si on considère cette résultante comme étant une mesure de l'effet globale des forces musculaires mises en jeu dans la direction antéro-postérieure, les résultats issus de l'EMG confirmeraient que les muscles posturaux contribuent au développement de la force de poussée horizontale. Afin de donner plus de poids à cette explication, Le bozec et Bouisset (2004) ont émis une autre hypothèse dans une tâche similaire : l'augmentation de la

mobilité posturale induirait une augmentation de la performance de la poussée associée à des APAs plus longs. Cette mobilité posturale a été créée en diminuant la surface de contact ischio-fémoral avec la chaise (100% vs. 30%), augmentant ainsi la mobilité du pelvis en rotation arrière. Leurs résultats confirment cette hypothèse puisque la force de poussée augmente en condition 30% du contact ischio-fémoral associé à une force horizontale résultante du corps ainsi qu'un déplacement vers l'arrière du CP plus important. Ces résultats sont associés par une augmentation de l'intensité et des latences des APAs. De même, cette réduction de la mobilité en configuration posturale assise pourrait tout à fait expliquer la diminution de l'accélération du bras lors d'une élévation à l'horizontale par rapport à la position orthostatique bipédale (Goutal et al., 1994; Van der Fits et al. 1998).

Par conséquent, une attention particulière doit être portée quand à la généralisation de résultats obtenus pour des études très circonscrites sur le sujet des interactions posture/mouvement (impliquant des tâches d'élévation ou de délestage du bras) à des études impliquant des conditions plus larges de mouvements (élévation d'un membre inférieur, tâche de pointage en dehors de la zone de préhension, application d'une force ... etc.).

4.2. Propriétés des APAs

Au travers de différentes études, trois facteurs peuvent affecter les APAs (Aruin et al., 1998) : l'amplitude et la direction de la perturbation à venir ce qui renvoie aux phénomènes liés à l'inertie du mouvement (c'est-à-dire, la vitesse, le poids supporté, ainsi que l'amplitude et la direction du mouvement). Le deuxième facteur est l'activité volontaire associée au mouvement. Le dernier facteur concerne la tâche posturale au travers des conditions de support et d'appui.

Les effets des deux premiers facteurs, relatifs à la perturbation à venir et à l'action motrice ont été étudiés de manière relativement poussée. Il a été montré que l'intensité des APAs est graduée en fonction de l'amplitude et de la direction de la perturbation (Horack et al., 1984 ; Dick et al., 1986 ; Lee et al., 1987 ; Bouisset et Zattara, 1990 ; Aruin et Latash, 1995a ; Mochizuki et al., 2004). De plus, les expérimentations utilisant une charge afin d'augmenter la perturbation posturale ont permis aux expérimentateurs de dissocier les effets de l'amplitude de l'action motrice avec celle de la perturbation posturale sur les APAs. De tels travaux ont suggéré un impact différent de ces deux facteurs sur les APAs (Dufossé et al., 1985 ; Paulignan et al., 1989 ; Aruin et Latash, 1995b, 1996).

Les résultats contradictoires des travaux sur l'impact de la tâche posturale sur les APAs suggèrent une relation non monotone entre les deux. Les APAs associés au mouvement volontaire sont atténués voir absents lorsque la posture est très instable (Nouillot et al., 1992 ; Aruin et al., 1998 ; Slijper et Latash, 2000). En effet, cette étude montre une absence d'APAs lors d'un mouvement de flexion d'un membre inférieur depuis une posture initiale unipodale par opposition à une posture initiale bipodale où l'activité EMG de la cheville et de la hanche montre clairement des APAs. Ces résultats suggèrent qu'un mouvement volontaire à vitesse maximale ne requiert pas d'APAs lorsque la posture initiale est instable. Par opposition à ces résultats issus d'une posture initiale instable, Cordo et Nashner (1982) ainsi que Nardone et Schieppati (1988) montrent une absence d'APAs pour une posture très stable.

Dans cette perspective, la position assise a été étudiée lors de l'élévation d'un bras par rapport à une condition orthostatique bipédique (Van der Fits et al., 1998). L'activité EMG enregistrée au niveau des ischio-jambiers et des extenseurs lombaires, thoraciques et du cou montre un début d'activité dans les 50 à 100 ms après l'activation du muscle responsable du mouvement (deltoïdus anterior) suivant une synergie posturale descendante. Par opposition, ces auteurs trouvent une synergie posturale ascendante en condition bipédique conforme à la littérature avec des APAs au niveau des ischio-jambiers et des extenseurs lombaires. Ces résultats montrent clairement une dépendance de la configuration segmentaire (tâche posturale) et donc de la stabilité sur la présence d'APAs ainsi que la synergie posturale adoptée (ascendante vs descendante). Cette modification de la synergie posturale et la quasi-absence d'APAs en condition assise par rapport à la condition debout peut provenir de trois phénomènes. Premièrement, la base de sustentation en position assise est plus importante qu'en position debout. Cela a pour effet de faciliter la tâche de maintien de la projection du CG à l'intérieur de cette base de sustentation (Zacharkow, 1988 cité par Aruin et Shiratori, 2003). Deuxièmement, le CG est plus proche de la base de sustentation. Pour créer une instabilité posturale, il faut donc générer un moment dans le plan frontal plus important. Troisièmement, puisque les membres inférieurs du corps sont supportés en condition assise, l'inertie du corps est donc moins importante (Aruin et Zatsiorski, 1989 cités par Aruin et Shiratori, 2003).

Cette absence d'APAs lors de l'élévation d'un bras en condition assise est cependant contradictoire avec d'autres études portant sur la même configuration posturale mais pour l'exécution d'un mouvement différent. Lors d'une tâche de pointage dans cette posture assise, Teyssède et al. (2000) ont mis en évidence un pattern reproductible des APAs impliquant les

muscles du tronc et des hanches (obliquus externus et rectus femoris). Ce résultat est corroboré par l'apparition de forces de réaction débutant autour de 30 à 50 ms avant l'initiation du mouvement de pointage (Moore et Brundt, 1991). Cette controverse est alimentée par des études antérieures puisque Moore et al. (1992) ont observé une activation du muscle deltoïde antérieur précédant l'activation des muscles posturaux oblique externe et paraspiniaux. Il apparaît donc évident que la présence des APAs en condition assise est fortement dépendante du type et des conditions de réalisation du mouvement focal.

4.3. Mode de coordination entre posture et mouvement

La question du mode d'organisation entre la posture et le mouvement provient du rôle et des propriétés même des APAs. Puisque l'un des rôles des ajustements posturaux est de maintenir l'équilibre, la commande en Feedforward doit nécessairement prendre en compte les caractéristiques même du mouvement, telles que la vitesse et la direction, pour être efficace. Par conséquent, les aires corticales qui participent au contrôle du mouvement peuvent aussi contribuer aux ajustements posturaux. En référence au schéma sur l'organisation centrale du mouvement proposé par Allen et Tsukahara⁷ (1974), certaines régions sont responsables de la préparation et de l'initiation du mouvement (aires corticales associatives, ganglions de la base), d'autres concernent l'exécution du mouvement (cortex moteur et voies descendantes rubrospinale et vestibulospinale ainsi que certaines parties du cervelet). Ainsi, les ajustements posturaux sont-ils contrôlés par les aires responsables de l'exécution du mouvement ou sont-ils contrôlés par les aires impliquées dans la préparation et l'initiation de la commande focale ?

Différentes expérimentations ont permis de montrer que les ajustements posturaux sont associés à l'exécution du mouvement à un bas niveau, au niveau du tronc cérébral. En effet, les résultats impliquant un mouvement induit par une stimulation électrique du cortex moteur et des noyaux rouges (Gahéry et Massion, 1981) observé chez le chat corroborent cette hypothèse. Lorsque le mouvement est produit par cette stimulation électrique, il s'accompagne par un ajustement postural diagonal, c'est-à-dire contralatéral à la stimulation électrique, se produisant de manière anticipée par rapport au mouvement. Ce résultat suggère donc que chaque site de stimulation corticale incorpore un réseau neuronal impliqué dans le contrôle du mouvement et des APAs associés à celui-ci. Plus précisément, puisque cet

⁷ Voir partie I.1.2 sur la séquence d'activation des aires corticales.

ajustement postural est controlatéral à la stimulation corticale, il semble être organisé le long des voies descendantes où les voies pyramidales et rubrospinales convergent. Bien que les ajustements posturaux semblent s'organiser à ce niveau, leur exécution apparaît comme étant régulée par plusieurs boucles incluant le cervelet : les voies cerebello-rubrospinales et les voies cerebello-thalamo-corticales (Smith et al., 1978). Massion (1992) a décrit deux modes de coordination entre la posture et le mouvement relatif à la dichotomie de l'organisation posture/mouvement. Il existerait deux contrôles : un contrôle de la posture et un contrôle du mouvement ayant des rôles différents, tous les deux impliqués dans l'action motrice. Le premier mode de contrôle (Figure II-5 A) émerge des différentes observations précédentes. Ce mode de contrôle est appelé hiérarchique, consiste en une voie contrôlant le mouvement qui envoie des collatérales sur les réseaux neuronaux responsables des APAs. Ce modèle suggère qu'une seule commande du SNC est responsable de l'exécution de la posture et du mouvement. Le mouvement volontaire et les ajustements posturaux s'effectuent donc dans le même temps.

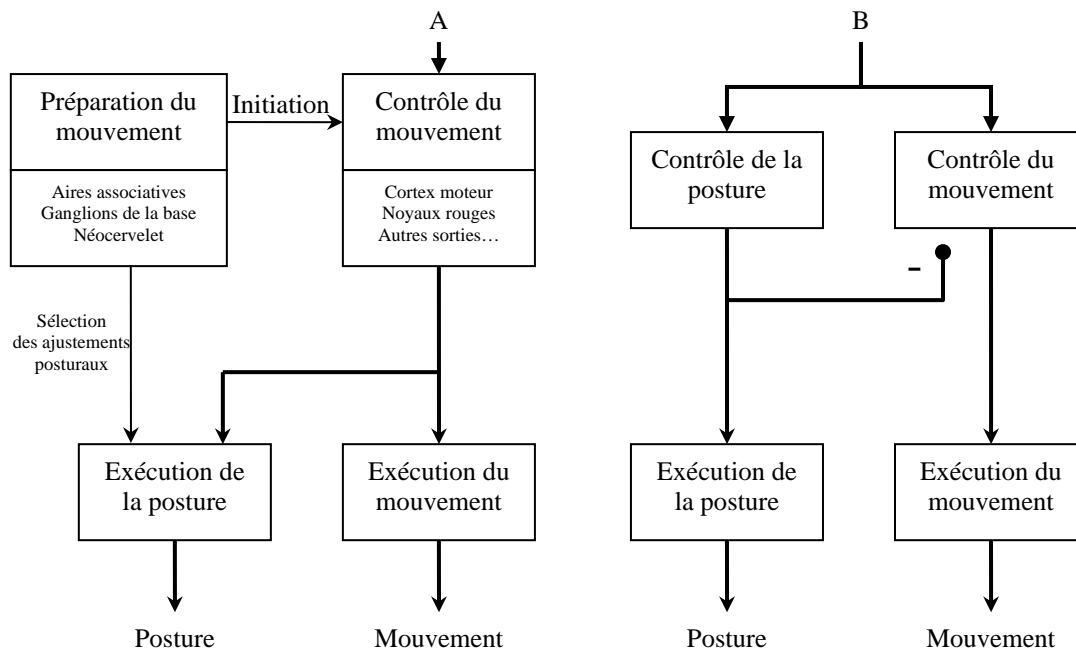


Figure II-5 : Deux modes de coordination entre la posture et le mouvement (adaptée de Gahéry et Massion, 1981 et Massion 1992).

A. Mode hiérarchique, B. Mode en parallèle (Massion, 1992). Le signe - indique une inhibition de la commande du mouvement (voir texte pour plus de détails).

Le second mode de contrôle (Figure II-5 B) est appelé parallèle. A défaut du mode de contrôle hiérarchique, deux commandes centrales, exécutées en parallèle, sont responsables du contrôle de la posture et du mouvement. D'une part, les ajustements posturaux s'effectuent

avant le début du mouvement et d'autre part, la commande de ce mouvement peut être annulée voire retardée (-) si les conditions d'exécution ne sont pas propices au maintien de l'équilibre. Ce mode de contrôle parallèle a été mis en évidence grâce aux études portant sur les APAs générés dans deux conditions de déclenchement différents : le déclenchement consécutif à un SI, réactif et le déclenchement auto-initié, projectif. Ces différences au niveau postural seront traitées dans le prochain paragraphe intitulé Impacts du mode de déclenchement sur les APAs (partie 4.4).

Dans le domaine du contrôle moteur, ces deux types de condition (projectif vs. réactif) mettent en jeu deux organisations différentes de la commande motrice. Le système nerveux synchroniserait les retours sensoriels issus de deux commandes centrales pour deux mouvements projectifs différents (Paillard et al., 1989). Afin d'étayer cette hypothèse, ces derniers ont demandé au sujet de déclencher simultanément un mouvement de relèvement de l'index et du talon droit en condition auto-initiée ou projective et en condition réactive à l'apparition d'un SI. La distribution des écarts entre la commande motrice de ce mouvement synchrone de relèvement du talon et de l'index montre une précession du mouvement de la main en mode réactif (20 ms) alors qu'une précession du pied est observée en mode projectif (10 ms). Notons que ces deux distributions se situent à l'intérieur d'une zone d'incertitude dans laquelle le sujet ne peut perceptivement évaluer la non simultanéité des informations en provenance du pied et de la main. Ainsi, le mode réactif supposerait un déclenchement synchrone de la commande au niveau du cortex moteur avec une précession de la main sur le pied correspondant aux délais de conduction des voies efférentes. Le mode projectif, par contre, où le mouvement du pied précède celui de la main correspondrait à une commande motrice élaborée en vue d'obtenir le retour synchrone des informations sensorielles sur l'exécution des deux mouvements. Le délai observé entre le mouvement du pied et de la main tiendrait alors compte des différences de conduction des voies afférentes.

4.4. Impacts du mode de déclenchement du mouvement sur les APAs

Une quatrième propriété des APAs est apparue dans la manipulation des conditions d'exécution du mouvement projectif et réactif (auto-initiée vs. conditions de TRS et de TRC, respectivement). Cependant, il est nécessaire d'éclaircir la notion de processus réactif lors de l'étude des APAs. Au sens strict du terme, le processus réactif est utilisé lorsque le sujet est incapable de prévoir au moins une caractéristique de la perturbation à venir ou du mouvement à effectuer. Une telle analyse des processus réactifs dans le domaine postural amène donc à

analyser la posture dans deux type de conditions : une condition auto-initiée et une condition de perturbation externe ou imposée généralement initiée par l'expérimentateur. Nous parlerons alors de conditions de perturbation posturale passive et active, respectivement. Les résultats généralement obtenus consistent à une absence de commande en Feedforward, c'est-à-dire une absence d'APAs dans la condition passive, augmentant ainsi la perturbation posturale (Hugon et al., 1982 ; Aruin et Latash, 1995b). Cependant, sous certaines conditions (e.g., lors d'une prédiction temporelle importante du moment de la perturbation posturale), la perturbation externe générée par l'expérimentateur peut être compensée par de légers APAs. Tel est le cas lors d'un mouvement de chute d'un objet, balle ou poids uniquement si le sujet dispose de la vision afin d'estimer le moment d'impact (Lacquaniti et Maoli, 1989 ; Aruin et al., 2001).

L'utilisation du processus réactif lors d'une étude sur les APAs suppose une perturbation posturale interne au système c'est-à-dire, créée par le sujet lui-même (condition active), sous une contrainte temporelle forte. Nous parlerons alors du mode de déclenchement différent. Ainsi, l'impact des processus réactif sur les APAs peut être plus ou moins important selon le type de contraintes ou d'incertitudes sur la perturbation posturale.

4.4.1. APAs et contrainte temporelle (TRS)

Toutes les études portant sur le sujet montrent une diminution des APAs en condition de TRS par rapport à une condition auto-initiée. Rappelons que la tâche de TRS introduit une pression temporelle à l'exécution du mouvement, pression absente lors de la condition auto-initiée. En dissociant les TRS en quatre groupes (TR1 à TR4, du plus court au plus long), De Wolf et al. (1998) ont montré une diminution de la latence temporelle des APAs au niveau des Erector Spinae ainsi que du Biceps Femoris quelle que soit la tâche motrice (élévation du bras à l'horizontale ou délestage d'une charge au niveau des bras, à partir de l'horizontale). Cette diminution de la latence des APAs se répercute sur le déplacement du CP uniquement lors de la tâche de délestage. En effet, on observe un déplacement plus important vers l'arrière du CP à l'instant du délestage lors des TR les plus longs, déplacement de même amplitude que la condition auto-initiée. Lors de l'élévation unilatérale d'un bras, Nougier et al. (1999) confirment cette diminution de la latence des APAs au niveau des Semitendineux et Gastrocnémiens ipsilatéraux ainsi que le Tenseur du Fascia Lata Controlatéral par rapport à la condition auto-initiée. Notons que dans les deux études présentées, les accélérations du bras ont été mesurées afin d'écarter l'influence de la vitesse d'exécution sur cette diminution des

APAs. La diminution de ces APAs en condition de TRS engendrerait une légère instabilité posturale sans différence significative du déplacement total du CP (74.4 vs. 76 mm). En effet, en quantifiant le temps des variations du CP à l'intérieur de zones concentriques d'incrément croissant de 5 mm, ces auteurs ont montré que les sujets passent plus de temps dans les deux premières zones en condition auto-initiée par rapport à la condition réactive (68% vs. 58%, respectivement). Ces auteurs suggèrent donc l'existence de deux différents modes de contrôle pour le mouvement intentionnel du bras. Dans la condition de TRS, la coordination entre la posture et le mouvement serait basée sur une stratégie où les commandes focale et posturale seraient dépendantes dans le temps : « Time-locked strategy ». Les muscles posturaux seraient synchronisés par rapport à l'apparition du mouvement. Ainsi lorsque la prédiction de l'initiation de la réponse est faible, cette synchronisation entre la commande focale et posturale serait la meilleure stratégie pour programmer une commande motrice dans un temps relativement court (c'est-à-dire, sous contrainte temporelle). Cette stratégie consistant à envoyer simultanément la commande posturale et focale rappelle les résultats d'expérimentations manipulant ces conditions similaires d'initiation du mouvement pour synchroniser le mouvement d'extension d'un doigt et du talon (Paillard et al., 1989). Par opposition, l'élévation du bras dans la condition auto-initiée serait sujette à une meilleure planification temporelle permettant de mieux dissocier les deux commandes envoyées aux muscles posturaux et focaux. La présence de ces deux stratégies différentes suppose donc une planification en détails des APAs. Le SNC programmerait des commandes posturales et focales différentes pour chaque situation (Benvenuti et al., 1997). Ces interprétations renvoient directement au mode de contrôle en parallèle décrit précédemment. Ces résultats généralement observés dans la direction antéro-postérieure se retrouve au niveau de la composante asymétrique d'un mouvement d'élévation unilatéral du bras. Le moment développé autour de l'axe vertical (T_z) utilisé par Bleuse et al. (2002) présente un retard en condition de TRS avec un pic plus important, traduisant une préparation posturale plus tardive et plus brève mais plus intense permettant de compenser ce retard d'anticipation.

4.4.2. APAs et incertitude événementielle (TRC)

Les travaux de Slijper et al. (2002) montrent des résultats très intéressants concernant les effets d'une incertitude temporelle (tâche de TRS) ou d'incertitude temporelle et événementielle (tâche de TRC) sur les APAs par rapport à une condition auto-initiée. Nous ne reviendrons pas sur les effets de l'incertitude temporelle. Cependant, lorsqu'une incertitude

événementielle est ajoutée : lorsque le sujet ne peut prévoir, avant l'apparition du SI, la perturbation qu'il va générer, les APAs apparaissent plus tôt qu'en situation de TRS et ne sont pas significativement différents de la condition auto-initiée. Les résultats issus du déplacement du CP corroborent ce phénomène : en condition auto-initiée, le déplacement du CP débute très tôt et évolue relativement lentement. En condition de TRC, le CP débute plus tardivement, progresse plus rapidement et rattrape la position du CP en condition auto-initiée 50 ms après le début du mouvement. En condition de TRS le déplacement du CP débute encore plus tardivement, progresse lentement et ne rejoint donc pas la position du CP observée dans les deux autres conditions (à t_0+50 ms). Ainsi, alors que l'incertitude temporelle diminue nettement les APAs, l'incertitude événementielle du mouvement à produire ajoutée à l'incertitude temporelle limite cette diminution.

Ainsi, les paramètres liés à l'incertitude du mouvement semblent influencer les APAs. L'étude de Brown et Frank (1987) se basait sur une procédure de priming et avait pour volonté d'explorer la possibilité d'une activation des APAs contrôlée par l'état général de préparation du sujet. Ainsi, le sujet devait pousser ou tirer une poignée à l'aide des deux mains. L'information sur la direction de l'action des membres focaux était biaisée par un indice de probabilité de 80%, 50% et 20%. Cette information, étant donnée avant l'exécution du mouvement, a permis au sujet de prédire la direction de l'action avec une certitude de 80, 50 et 20 %, respectivement. Ces auteurs faisaient l'hypothèse que lors d'une préparation importante (80%), le TR devrait être le plus court possible avec une activation des muscles posturaux plus anticipée par rapport à l'activation des muscles focaux (c'est-à-dire, APAs plus importants). En analysant le temps séparant le SI du début d'activation des muscles focaux et posturaux, ces auteurs ont montré une influence différenciée du début d'activation des muscles posturaux et focaux en fonction du niveau de la préparation. Ce début d'activités posturale et focale est le plus court pour la préparation la plus importante (80 %, environ 180 vs. 240 ms, respectivement) et augmente lorsque la direction n'est pas connue à l'avance (50 et 20 %). Cependant, lors de la condition de préparation faible (20%), le début de l'activité posturale reste identique à la condition de préparation neutre (50%, environ 300 ms) mais l'activité focale est retardée (environ 500 ms vs. 400 ms). Ces résultats montrent que la qualité de préparation influence la coordination entre la posture et le mouvement uniquement lors d'une reprogrammation effective du mouvement, c'est-à-dire, lors d'une faible préparation. La reprogrammation de la direction du mouvement à effectuer nécessiterait un temps additionnel pour activer le muscle focal mais pas pour les muscles posturaux. Par

conséquent, le temps de latence entre l'activation posturale et focale est constante suggérant que ces activités sont contrôlées par deux commandes centrales séparées (Mode de coordination en parallèle).

4.5. Effets du vieillissement sur la coordination posture/mouvement

Comme nous l'avons vu au premier chapitre, l'effet de l'âge implique une diminution du temps de mouvement. Les travaux de Goggin et Meeuwsen (1992) ont montré, pour un mouvement de pointage réaliser avec précision, un pic d'accélération plus faible et un temps pour atteindre ce pic plus important. Ce pic d'accélération faisant partie intégrante d'une commande préprogrammée, cet effet se répercuterait sur la composante posturale puisque les APAs et le déplacement du CP seraient fonction de la vitesse du mouvement. Cette diminution de la vitesse du mouvement focal est généralement observée dans les expérimentations s'intéressant à la coordination posture/mouvement (Rogers et al., 1992 ; Blaszczyk et al., 1997 ; Garland et al., 1997 ; Bleuse et al., 2005). Woollacott et Manchester (1993) se sont posés la question suivante : l'effet de l'âge affecte-t-il directement la capacité de préparation des APAs ou provoque-t-il un temps de mouvement plus important, qui, en retour, implique un besoin moins important de produire des APAs ? Afin de répondre à cette question, les sujets exécutaient mouvement d'une élévation de bras sous différentes contraintes de vitesse (50% et 75% du maximum). Ainsi, si les personnes âgées maintiennent une vitesse comparable à celle des jeunes adultes, toutes les altérations observées dans cette étude entre la commande focale et posturale seront attribuées à l'effet de l'âge. Les résultats ont montré des différences liées à l'âge dans la séquence temporelle des muscles posturaux *erector spinae* et *quadriceps* controlatéraux. Le muscle *erector spinae* serait activé plus tardivement par rapport à l'activation du deltoïde chez les personnes âgées, certains d'entre eux montrant des APAs. De plus, ces sujets ont montré une activation plus fréquente du *quadriceps* dans toutes les conditions. Cependant, la vitesse d'élévation du bras n'était pas différente entre les deux populations. Par conséquent, les deux groupes d'âge présentaient des différences au niveau de la stratégie posturale en fonction des conditions de vitesse d'exécution ce qui indique des modifications de stratégie et/ou des effets d'ordre cognitif influençant la réponse motrice des personnes âgées.

Mankovskii et al. (1980) sont les premiers à s'intéresser au déficit de la coordination entre la posture et le mouvement lié à l'âge. Cette étude a comparé les caractéristiques des APAs dans trois populations d'âge différent (10-29 ans, 60-69 ans et 90-99 ans). La tâche

consistait à l'élévation d'un pied en fléchissant un genou. Cette coordination posture/mouvement chez les personnes âgées est caractérisée par un temps de latence plus important de la commande posturale et focale sans pour autant observer une augmentation de pertes d'équilibre. Cependant, concernant la population extrêmement âgée, ces auteurs ont observé une incapacité à activer les muscles posturaux bien avant les muscles responsables du mouvement focal afin de prévenir toute perte d'équilibre. Ces résultats ont été confirmés par la suite dans diverses situations motrices (Horak et al., 1984 ; Woollacott et al., 1988 ; Rogers et al., 1992 ; Woollacott, 1993 ; Woollacott et al., 1993 ; Bleuse et al., 2005). Lorsque la consigne était de bouger le plus rapidement possible en situation de TRS, les sujets extrêmement âgés activaient la commande posturale et focale simultanément. L'effet de l'âge augmenterait ainsi le degré d'instabilité posturale via une diminution de la production d'APAs. Cet effet est contradictoire avec les travaux de Franks et al. (1987) et Inglin et Woollacott (1988) concernant une tâche de temps de réaction (pousser/tirer un levier). Le temps séparant l'apparition du SI et le début de la commande focale et posturale augmentait avec l'âge avec un délai plus important concernant la commande focale en condition de TRC. Ce phénomène accroît donc le temps de latence entre la commande focale et posturale. La différence de résultat observé entre ces études pourrait provenir dans l'utilisation d'un support additionnel au niveau des mains. En effet, dans l'étude de Mankovskii et al. (1980) et Woollacott et Manchester (1993), les sujets exécutaient une élévation de bras sans support postural extérieur.

Enfin, en manipulant une tâche de TRS et TRC en condition assise et debout, Stelmach et al. (1990) ont montré une augmentation du TR plus importante chez les seniors en fonction de la condition posturale. Ces auteurs ont ainsi suggéré que les processus de stabilisation posturale contribueraient à l'augmentation du TR, cette dernière n'étant pas uniquement due à une dégradation des processus de traitement de la réponse focale avec l'âge.

QUESTIONS ET OBJECTIFS

L'objectif de ce travail est d'étudier les phénomènes de préparation situés « en dérivation » par rapport à la chaîne de traitement d'une *réponse posturo-cinétique*. Nous avons donc placé le sujet dans des situations permettant de prédire ou non l'apparition du SI renseignant sur les paramètres du mouvement focal et/ou de la perturbation posturale lors de deux conditions posturales différentes (*assis* vs. *debout*). Grâce à cette prédiction, le sujet

serait capable de préprogrammer certains paramètres durant la PP et ainsi de diminuer le TR rendant compte d'une préparation efficace. La question était alors de savoir si cette préparation intégrait les phénomènes posturaux permettant de minimiser la perturbation posturale lors d'un mouvement. Cette question renvoie au mode de coordination entre la posture et le mouvement. Elle n'est pas évidente au regard de la multitude des travaux sur le sujet. Une synthèse de ces derniers ferait apparaître une relation non-monotone entre l'incertitude globale du mouvement et la composante posturale ayant pour fonction de minimiser la perturbation posturale associée au mouvement. Les travaux portant sur une perturbation posturale active (créée par le sujet) et une perturbation posturale passive (subie par le sujet) montre une stabilité plus importante lors d'une perturbation active grâce à l'émergence d'une commande anticipée (Hugon et al., 1982 ; Dufossé et al., 1985 ; Aruin et Latash, 1995b). Lorsque l'incertitude temporelle de la perturbation posturale passive est levée, grâce notamment à l'utilisation des informations visuelles permettant d'estimer le moment de l'impact d'un objet avec la main, la perturbation posturale qui s'ensuit est légèrement atténuée par la présence d'APAs (Lacquaniti et Maoli, 1989 ; Aruin et al., 2001 ; Shiratori et Latash, 2001) (cf figure II-6). La prédiction temporelle revêtirait donc une importance dans l'apparition des APAs. Ce premier résultat laisse à penser que la diminution de l'incertitude temporelle dans la condition passive augmente les APAs et donc la stabilité posturale. Nous pourrions alors étendre cette relation à la quantité d'incertitude en supposant que plus l'incertitude de la perturbation est levée, plus le SNC est capable de générer des APAs afin de diminuer l'instabilité posturale. Nous aurions alors une relation monotone entre la quantité d'APAs générés et la levée de l'incertitude relative à la perturbation posturale à venir.

Cependant, cette relation ne s'applique pas à la condition active. Lorsque la perturbation posturale est initiée par le sujet sous des contraintes temporelles et/ou événementielles décroissantes (TRC vs. TRS), nous observons une diminution de la quantité d'APAs. Par ailleurs, les APAs semblent également diminuer en condition de TRS par rapport à une condition auto-initiée (sans aucune contrainte). En effet, lorsque l'incertitude globale de la tâche diminue (TRC, TRC vs. Auto-initiée), Slijper et al. (2002) ont montré une quantité d'APAs en condition de TRC quasi-semblable à la condition auto-initiée. Au regard de ces résultats, la contrainte temporelle semble être un élément important de la coordination entre la posture et le mouvement.

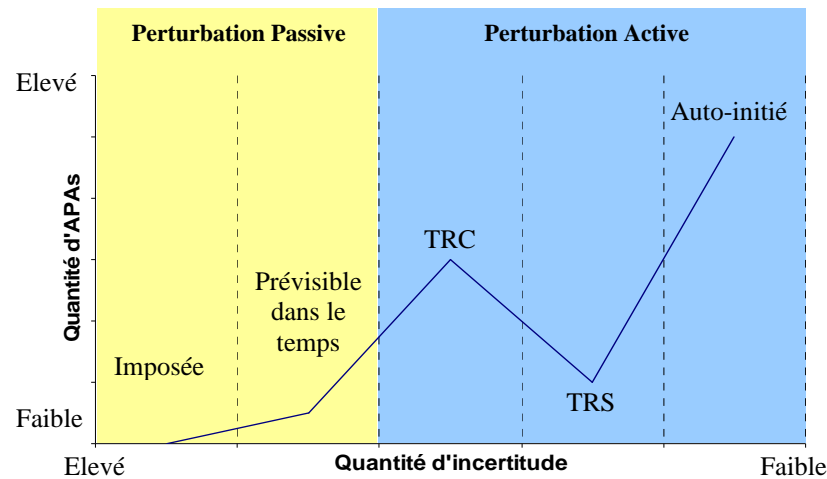


Figure II-6 : Quantité d'APAs en fonction de Quantité d'APAs en fonction de l'incertitude de la perturbation posturale à venir.

Nous avons donc pensé à manipuler la durée de la PP afin de manipuler l'incertitude temporelle de la préparation de la tâche posturo-cinétique. Nous nous sommes donc basés sur les travaux issus de la chronométrie mentale et avons étudié l'évolution du TR en fonction de la durée de la PP, ce qui nous a permis de déterminer l'optimum de préparation de cette tâche posturo-cinétique. Cet optimum de préparation avait été jusqu'à présent mis en évidence uniquement lors d'une tâche motrice n'impliquant aucune perturbation posturale et en minimisant les effets d'un maintien postural sur le TR. En d'autres termes, les sujets étaient confortablement assis et dans la majorité des cas, ils devaient émettre une réponse motrice sous la forme d'une action de l'index sur un bouton. Par conséquent, cette préparation optimale rendrait compte d'une préparation excluant tout phénomène lié à la coordination entre la conservation de l'équilibre postural et la production d'un mouvement perturbant cet équilibre.

Pour étudier les APAs, nous avons demandé aux sujets de réaliser un mouvement d'un des membres supérieurs en position bipédique. Nous avons utilisé deux tâches motrices, la première consistait à élever un bras et la seconde à délester un poids les bras parallèle au sol. Comme nous l'avons vu précédemment, ce type de mouvement implique une perturbation dans l'axe antéro-postérieur ainsi qu'une perturbation asymétrique lors de l'élévation d'un seul bras. Les APAs ont été évalués grâce à l'analyse de deux types de données : les forces et moments des réactions au sol, et 2) l'activité électromyographique de différents muscles qui reflètent bien la commande motrice.

ETUDE 1 : Identification d'une PP optimale en condition debout

Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier l'existence d'une PP optimale spécifique à la condition debout lors d'une préparation sélective. Pour ce faire, nous avons manipulé plusieurs durées de PP dans deux conditions posturales différentes (*assis* et *debout*). L'hypothèse principale concerne l'existence d'un optimum de préparation plus important en condition *debout* qu'en condition *assis*. Ce temps additionnel rendrait compte d'un temps de préparation supplémentaire relatif à une contrainte posturale plus grande. Dans un deuxième temps, nous avons cherché à analyser la coordination entre la posture et le mouvement en fonction de la durée de la PP.

ETUDE 2 : PP optimale et complexité posturale lors d'une préparation neutre

La deuxième étude pose certaines questions sur l'origine de ce temps additionnel. Provient-il d'une préparation anticipée de la commande (préparation spécifique des APAs) ou d'une complexité globale de la posture bipédique par rapport à la condition assise ? La controverse sur la présence des APAs en condition assise nous a incité à vérifier ce questionnement. De plus, nous avons utilisé une préparation neutre ne permettant pas de préparer une commande posturale durant la PP. Si l'augmentation de cet optimum de préparation, observée lors d'une préparation spécifique, est de nouveau présente, nous pourrions conclure que ce temps additionnel n'est pas dépendant d'une préparation anticipée spécifique de la commande posturale.

ETUDE 3 : Effet d'une prise d'information sur la perturbation posturale à venir

Nous avons vu que la préparation neutre engendrait généralement une augmentation du temps prémoteur par rapport à une préparation sélective. Nous avons donc mis en place une étude portant sur la comparaison entre ces deux types de préparation afin de montrer s'il existait un gain de la commande posturale relatif à l'utilisation d'une préinformation sur la perturbation posturale durant la PP. Pour ce faire, nous avons du utiliser une tâche où l'exécution d'un même mouvement focal permettait d'obtenir ou non une perturbation posturale. Notre choix s'est donc porté sur une tâche de délestage en condition debout. En fonction de la présence ou non d'une information sur la perturbation posturale durant la PP, du TR associé et de la quantité d'APAs, nous serons capables de déterminer si la commande posturale anticipée peut être préprogrammée durant la PP. De plus, nous nous sommes

intéressés à l'effet de l'incertitude du moment d'apparition du SI, en présentant une PP aléatoire, sur la coordination entre la posture et le mouvement afin de déterminer si la relation TR-APAs est dépendante ou non de la prédiction temporelle du moment d'apparition du SI.

ETUDE 4 : Effet de l'âge et d'une reprogrammation du mouvement focal sur les APAs

Enfin, la dernière étude porte sur l'effet de l'âge, connu pour influencer les processus de préparation tant au niveau postural que focal. Cette étude a donc porté sur l'influence de l'âge sur les processus de préparation mais surtout de reprogrammation, c'est-à-dire lorsque le mouvement préparé est différent du mouvement à exécuter. Dans cette optique, nous avons manipulé la contrainte temporelle de préparation (c'est-à-dire, la durée de la PP) en fonction de l'âge dans deux situations : lorsque cette préparation est effective et lorsqu'elle est inutile. De plus, nous nous sommes posés la question d'une possible augmentation du TR en fonction de la préparation des APAs. Nous avons donc comparé le TR d'un mouvement d'élévation d'un bras engendrant des APAs avec un mouvement réduit du même effecteur qui n'impliquait pas de perturbation posturale.

La manipulation des différentes variables indépendantes concernant la préparation motrice telle que la durée de la PP, sa nature et son mode de présentation (neutre vs. sélective, aléatoire vs. bloquée, respectivement) nous a permis de mieux comprendre la relation non-monotone existant entre les APAs et les contraintes temporelles et/ou événementielles perturbant la coordination entre la posture et le mouvement.

CHAPITRE III: ÉVOLUTION DE L'OPTIMUM DE PRÉPARATION EN FONCTION DE LA CONDITION POSTURALE⁸.

1. INTRODUCTION

Les différents travaux basés sur la chronométrie mentale ont pu déterminer un optimum de préparation pour une réponse motrice, c'est-à-dire, une durée de la PP induisant le TR le plus court. Lorsque la durée de la PP est manipulée avec des écarts relativement faibles, l'optimum de préparation est observé pour une PP de l'ordre de 500 ms (Posner et Boies, 1971). Cette durée représente donc le temps de préparation rassemblant l'ensemble des événements permettant de répondre le plus rapidement possible. Dans toutes les études portant sur cet effet, cette préparation ne tiendrait pas compte de la gestion de la posture et de l'équilibre. En effet, les sujets devaient répondre par un mouvement n'impliquant aucune perturbation posturale du corps. Ce dernier était disposé dans une configuration posturale stable. Les sujets étaient confortablement assis et la réponse motrice demandée était un mouvement de l'index permettant de presser un bouton. Cependant, lors de la station érigée, le mouvement d'un des segments corporels est généralement précédé et accompagné du déplacement d'autres segments qui ne sont pas directement impliqués dans le mouvement orienté vers le but (Massion, 1992). Ces déplacements sont appelés Ajustements Posturaux Anticipés (APAs) ou préparation posturale en fonction du moment de leur apparition (Gahery, 1987). De tels APAs sont observés lors de l'élévation d'un bras et ont pour objectif de minimiser la perturbation posturale qu'occasionne le mouvement sur la posture. Cependant, ces APAs évoluent en fonction de certains paramètres tels que la vitesse d'exécution du mouvement, le mode de déclenchement du mouvement perturbateur de l'équilibre (auto-initié vs. tâche de Temps de Réaction Simple (TRS) et de Temps de Réaction de Choix (TRC)).

Ces deux derniers modes de déclenchement ont été utilisés afin de comparer les stratégies posturo-cinétiques en fonction du temps prémoteur. D'un point de vue du contrôle moteur, la tâche de TRC implique un temps prémoteur plus important par rapport à une tâche de TRS, la différence observée étant relative à l'incertitude événementielle. Dans le domaine du contrôle postural, la latence entre la commande focale et posturale est différente en fonction du mode de déclenchement auto-initié et une tâche de TRS (Benvenuti et al., 1997 ;

⁸ Ce chapitre est adapté d'un article publié dans *Brain Research Bulletin* (Cuisinier et al., 2005).

De Wolf et al., 1998 ; Nougier et al., 1999). Les APAs seraient moins anticipés en condition de TRS et seraient plus synchronisés à l'apparition du mouvement. Quelques auteurs se sont intéressés à la condition de TRC (Brown et Frank, 1987 ; Slijper et al., 2002). La tâche de TRC impliquerait des APAs similaires à la condition auto-initiée. Ainsi, ces auteurs ont émis l'hypothèse d'une production des APAs qui serait fonction du temps imparti par le temps prémoteur. Plus le temps prémoteur est important plus les APAs seraient anticipés.

Leur caractère anticipé revêt une forme importante suggérant ainsi leur préprogrammation. La question est de savoir si ces APAs sont fonction d'une préparation effective du mouvement. L'objectif de cette étude est de rassembler les deux champs d'étude en analysant la préparation d'une réponse motrice associée à une perturbation posturale. En d'autres termes, 1) nous supposons l'existence d'une période préparatoire optimale plus importante en condition *debout* qu'en condition *assis*. Cette augmentation s'expliquerait par la présence d'un temps additionnel dédié à la programmation des ajustements posturaux associés au mouvement, et 2) analyser la modulation présumée des APAs en fonction de la durée de la PP et du temps prémoteur.

2. METHODE

2.1. Sujets

Huit sujets masculins droitiers, sans antécédent moteur ou neurologique (âge moyen 24 ± 2.67 ans de poids 71.7 ± 9.1 Kg et de taille 177 ± 7.8 cm) ont participé à l'expérimentation.

2.2. Matériel

Deux configurations posturales ont été utilisées, une posture assise et une posture debout. Durant le maintien bipodale, les sujets étaient placés sur une plate-forme de force (modèle AMTI OR-6), les bras le long du corps, les mains en pronation. Lors de la deuxième configuration posturale, les sujets étaient assis sur une chaise avec dossier, les jambes dans le prolongement du corps, les pieds placés suivant des marques tracées au sol de telle manière à obtenir un angle de 90° au niveau des genoux. Les bras et les mains étaient positionnés dans la même configuration que la condition debout. Les signaux provenant de la plate-forme de force ont permis l'enregistrement 1) des forces de réaction suivant l'axe vertical (F_z), et 2) de

deux moments dans le plan sagittal (M_y) et frontal (M_x). Un accéléromètre unidirectionnel (modèle Entran EGCS-DO-5-/L2M avec une sensibilité de 32 mV/g) a été placé sur la face dorsale des deux mains au niveau de l'articulation métacarpophalangienne du majeur. Des électrodes de surface bipolaire ont été utilisées pour l'enregistrement de l'activité EMG des muscles sur les deux côtés du corps : le *deltoïdus anterior*, muscles responsables du mouvement focal et deux muscles posturaux, le *tenseur du Fascia Latae* (TFL) et le *gastrocnemius lateralis* (Gastroc).

Deux diodes électroluminescentes rouges (\varnothing 0.8 cm) ont été insérées et espacées à 18 cm l'une de l'autre sur une planche de 30 cm de côté suivant l'axe horizontal. Ladite planche a été placée à 150 cm devant le sujet, alignée par rapport au centre du corps et à hauteur des yeux. Les sujets portaient des bracelets de 1 kg au niveau de chaque poignet afin d'augmenter la perturbation posturale consécutive à la production du mouvement. Une cordelette délimitant l'amplitude maximale du mouvement d'élévation des bras a été disposée à hauteur d'épaule, à 5 cm des mains.

Tous les signaux ont été enregistrés à une fréquence de 1000 Hz avec une résolution de 12 bits/s. Le système Datac a permis de contrôler l'expérimentation et de synchroniser les signaux issus des différents capteurs.

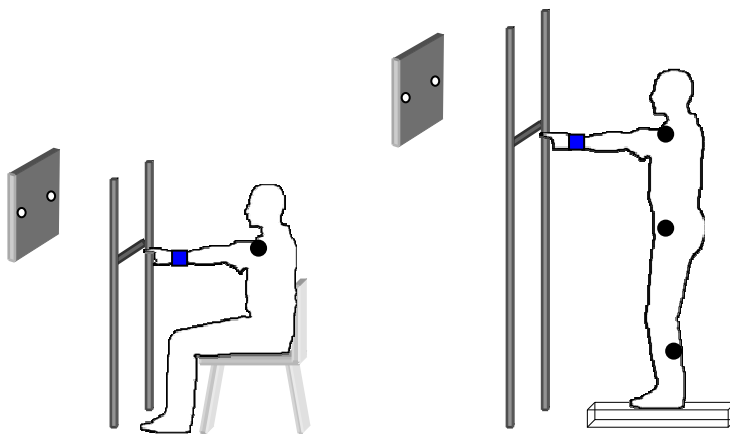


Figure III-1 : Illustration du matériel et de la procédure utilisés.

Exécution de l'élévation d'un bras à l'horizontale dans les deux conditions posturales. Les *carrés bleus* représentent le poids et l'accéléromètre placé au niveau de chaque poignet du sujet. En condition debout, les sujets étaient placés sur une plate forme de force avec un enregistrement électromyographique du TFL et du gastroc controlatéral au mouvement (*cercle noire*). L'activité électromyographique du deltoïdus anterior a été enregistrée pour obtenir le temps prémoteur dans les deux conditions posturales.

2.3. Procédure et conditions expérimentales

Durant cette expérimentation, deux variables indépendantes ont été manipulées : la condition posturale (Assis vs. Debout) et la durée de la PP en ms (PP₃₀₀, PP₅₀₀, PP₇₀₀ et PP₉₀₀).

Une fois la posture bipédique stabilisée, les sujets devaient élever un bras jusqu'à l'horizontale en réponse à deux signaux visuels consécutifs générés par le système Datac. Ces deux signaux correspondaient à un signal préparatoire (SP) suivi d'un signal impératif (SI), tous deux présentés durant 100 ms. La PP a été définie par le temps séparant ces deux signaux. Les instructions données aux sujets étaient de réagir le plus rapidement possible et de lever le bras droit ou gauche à vitesse maximale jusqu'à la cordelette en fonction du côté d'apparition du SI. Le sujet devait conserver la position finale jusqu'au signal auditif « OK ». Nous avons utilisé une *préparation sélective* : une procédure de priming (Rosenbaum et Kornblum, 1982). *Cette procédure consiste à donner une information préalable sur le côté du mouvement à produire (bras droit ou gauche), grâce au SP. Cette information qui est biaisée par un indice de probabilité.* Nous avons utilisé une probabilité de 70% vs. 30%, i.e., dans 70% des essais, le SI confirmait l'information sur le côté du mouvement à produire donnée par le SP. Il s'agissait des essais dits valides. Par opposition, dans 30% des essais, le SI ne correspondait pas au SP, essais définis comme étant non-valides. Ces derniers étaient utilisés afin d'éviter au sujet d'anticiper la production du mouvement pendant la PP. La probabilité d'essais valides/non-valides était identique pour chaque PP et chaque condition posturale.

Les différentes durées de PP ont été distribuées dans quatre blocs d'essais séparés et présentés aléatoirement dans chaque condition posturale. Chaque bloc était composé de 46 essais : 16 essais valides et 7 essais non-valides pour chaque bras. Un temps de repos de 5 sec et de 2 min était respectivement accordé entre chaque essai et chaque bloc expérimental afin d'éviter toute fatigue. Les sujets effectuaient deux essais d'entraînement avant chaque bloc et chaque condition posturale.

2.4. Analyses des Données

Les données ont été analysées grâce au logiciel Matlab.

2.4.1. Analyse électromyographique

Les signaux EMGs ont été rectifiés filtrés grâce à un filtre Butterworth passe-bas d'ordre 2, avec une fréquence de coupure de 1kHz. Le début de l'activité électromyographique de chaque muscle a été déterminé grâce à un programme algorithmique

marquant le premier point étant supérieur au seuil défini par la moyenne + deux écart-types de l'activité basale du muscle considéré, et ce, pendant les 30 ms suivantes. Une vérification visuelle du marquage a ensuite été réalisée. Les essais individuels ont ensuite été 1) synchronisés par rapport au début de l'activité EMG du muscle responsable du mouvement défini comme étant le t_0 , et 2) redimensionnés de $-300 t_0$ à t_0+2000 ms. Pour chaque essai, les APAs ont été quantifiés grâce au temps séparant le début de l'activité du TFL controlatéral et du gastrocnémus ipsilatéral du début d'activation du muscle focal (t_0). Une valeur négative indiquait une anticipation du TFL ou du Gastroc par rapport à t_0 . De plus, l'identification du t_0 a permis de dissocier le temps pré-moteur et le temps moteur du TR (cf. Figure I-6, page 14).

2.4.2. Analyse cinématique

Les données issues de l'accéléromètre unidirectionnel ont permis de déterminer le pic d'accélération de chaque mouvement afin de vérifier l'homogénéité de l'accélération du mouvement focal dans chaque condition. L'analyse du temps permettant d'atteindre ce pic n'était pas nécessaire du fait de la présence de la cordelette. Si ce pic avait été atteint plus tardivement, l'expérimentateur aurait pu observer une amplitude de mouvement supérieure à celle définie par la cordelette.

2.4.3. Analyse du déplacement du centre des pressions

Les déplacements du CP dans le plan antéro-postérieur (CP_y) ont été calculés suivant la relation :

$$\Delta CP_y = \Delta M_x / F_z$$

Équation 2

Où ΔM_y est une modification du moment par rapport à une valeur de base définie sur une fenêtre de -300 à -200 ms par rapport à t_0 . Trois déplacements ont été calculés : de la valeur de base jusqu'à la valeur correspondant au temps t_0 (ΔCP_{t_0}), de la valeur de base jusqu'au déplacement maximal arrière ($\Delta CP_{arrière}$), de ce déplacement maximal arrière au déplacement maximal vers l'avant (ΔCP_{total}). De plus, deux intervalles temporels ont été estimés : de l'apparition du SI jusqu'au début de variation du CP ($iniCP_x$) et de t_0 jusqu'au temps représentant $\Delta CP_{arrière}$ ($tCP_{arrière}$).

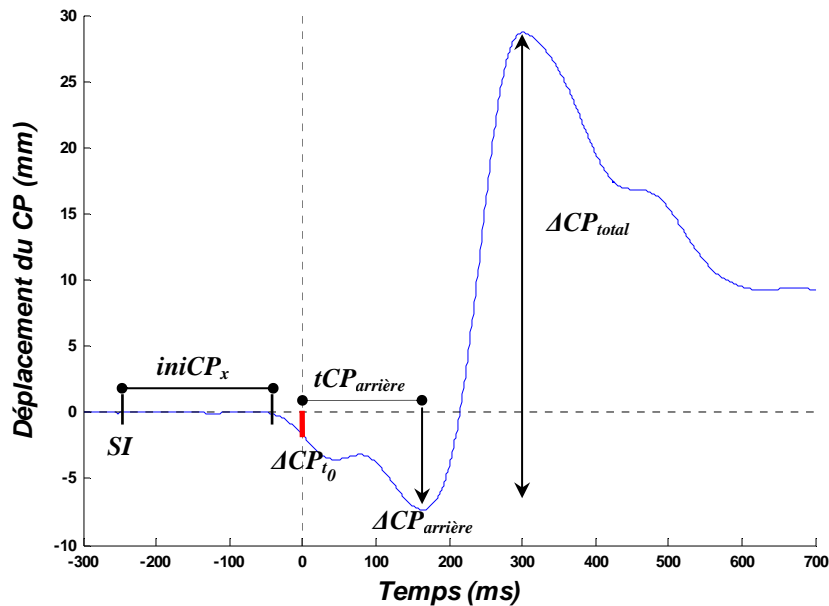


Figure III-2 : Déplacement antéro-postérieur du CP sur une fenêtre de -300 à +700 t_0 lors d'une tâche d'élevation de bras.

Lors de l'élevation d'un bras, le CP se déplace d'abord vers l'arrière par rapport à sa position d'origine. Le déplacement anticipé du CP à t_0 caractérise l'ensemble des APAs du corps, c'est-à-dire les effets mécaniques de l'activité électromyographique anticipée des muscles posturaux principalement de la face dorsale du corps. Le déplacement arrière du CP est caractérisé par son amplitude maximale et par le temps pour y parvenir ($t_{CP\text{arrière}}$ et $\Delta CP_{\text{arrière}}$). Ensuite, la production du mouvement entraîne une répartition des masses vers l'avant. Le déplacement du CP vers l'avant (ΔCP_{total}) permet donc un ralentissement de la fuite du CG dans cette direction, évitant ainsi la chute du corps. Ce déplacement correspond donc à la perturbation total du mouvement sur l'équilibre corporel.

2.5. Analyse statistique

Une analyse de variance ANOVA à deux facteurs Condition posturale (*assis* vs *debout*) \times Durée de la PP (300, 500, 700 et 900 ms) a été utilisée sur les variables accélération du mouvement, temps prémoteur et moteur.

Les données issues de la plate-forme de force et de l'activité des muscles posturaux ont été enregistrées uniquement lors de la condition posturale debout. Ainsi, une analyse de variance à un facteur (Durée de la PP) a été utilisée lors de cette condition. Une analyse post-hoc (Tuckey HSD) a été effectuée lorsque cela s'avérait nécessaire. La relation entre différentes variables a été analysée grâce à une régression linéaire. Le niveau de significativité a été fixé à $p < .05$.

La latéralité du mouvement focal n'a pas été retenue comme variable indépendante. Aucun effet significatif de la latéralité n'a été obtenu sur le temps prémoteur, les APAs issus du TFL controlatéral et ΔCP_{t_0} , [$F_{(1,7)}=1.6$, $p > .10$; $F_{(1,7)}=17.5$, $p > .10$ et $F_{(1,7)}=.4$, $p > .10$,

respectivement]. Par conséquent, Les données issues du bras droit et gauche ont donc été moyennées.

3. RESULTATS

3.1. Respect des consignes

Les premiers résultats concernent une vérification du respect des consignes données par l'expérimentateur, 1) exécuter le mouvement le plus rapidement possible et conserver cette même accélération pour toute les conditions, et 2) vérifier l'existence d'une préparation sélective en vérifiant que le TR est plus court en conditions valides qu'en conditions non-valides.

L'analyse du pic d'accélération du bras ne montre aucun effet significatif de la condition posturale [$F_{(1,7)}=2.1$, $p>.10$] et de la durée de la PP [$F_{(3,21)}=1.6$, $p>.10$]. Ce résultat est confirmé au niveau musculaire : aucun effet significatif de la condition posturale et de la durée de la PP n'a été obtenu sur le temps moteur [$F_{(1,7)}=.8$, $p>.10$; $F_{(3,21)}=.6$, $p>.10$, respectivement].

L'analyse du temps prémoteur montre un effet principal de la probabilité d'apparition du mouvement [$F_{(1,7)}=10.5$, $p<.05$]. Le temps prémoteur était plus court lors des essais valides par rapport aux essais non-valides (187.6 ± 15.7 ms vs. 202.1 ± 20.3 ms, respectivement).

Ces trois résultats suggèrent que le mouvement était réalisé de manière identique dans toutes les conditions. De plus, le sujet utilisait bien l'information préalable pour préparer son mouvement à l'avance (avant le signal impératif) et ainsi réduisait son temps prémoteur.

3.2. Effets de la condition posturale et de la PP sur le temps prémoteur

Afin de vérifier l'existence d'une PP optimale différente selon la condition posturale, l'Anova (2 conditions posturales \times 4 PPs) réalisée sur le temps prémoteur montre un effet principal de la condition posturale [$F_{(1,7)}=8.3$, $p<.05$] et de la durée de la PP [$F_{(3,21)}=9.6$, $p<.001$]. L'interaction entre ces deux facteurs est significative [$F_{(3,21)}=14.6$, $p<.001$]. Cette interaction montre que le temps prémoteur est plus court lors de la PP₅₀₀ par rapport à la PP₃₀₀ en condition assise (175.2 ± 17 ms vs. 190.1 ± 9.5 ms respectivement, $p<.01$). En condition

debout, le temps prémoteur diminue significativement de la PP₅₀₀ à la PP₇₀₀ et augmente pour la PP₉₀₀ (195.5 ± 12.3 ms, 175.5 ± 14.5 ms, et 192.6 ± 11 ms, respectivement). En d'autres termes, le temps prémoteur le plus court est observé pour une durée de la PP plus importante en condition *debout* qu'en condition *assis* (cf. Figure III-3).

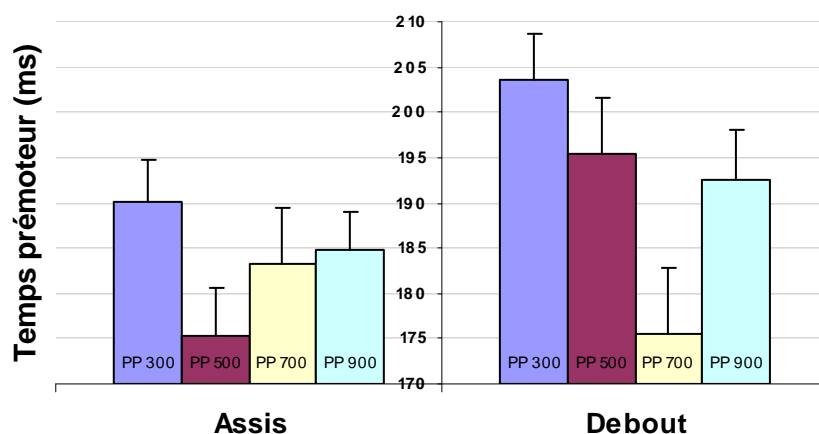


Figure III-3 : Évolution du temps prémoteur (ms) en fonction de la durée de la PP et de la condition posturale.

Il est intéressant de constater un temps prémoteur identique pour les durées de PP de 500 et 700 ms dans les conditions posturales Assis et Debout, respectivement.

Ces résultats montrent un décalage de l'optimum de préparation en fonction de la condition posturale. De plus, le temps prémoteur en condition debout est plus long qu'en condition assise exceptée pour la durée de la PP de 700 ms qui correspond à l'optimum de préparation.

3.3. Activité électromyographique dans la condition debout

Aucune variation de l'activité électromyographique n'a été observée sur le Gastrocnemius Lateralis. Les données électromyographiques portent donc uniquement sur le TFL controlatéral. L'analyse de la latence des APAs au niveau du TFLc en fonction de la durée de la période préparatoire (Anova : 4 durées de la PP) montre un effet principal de la durée de la PP [$F_{(3,21)}=3.4$, $p<.05$]. Le test post-hoc montre un début des APAs moins important lors de la PP₇₀₀ par rapport à la PP₃₀₀ (-28.4 ± 12.6 ms, -24.8 ± 9.5 ms, -20.9 ± 6.7 ms et -22.9 ± 10.3 ms, pour la PP₃₀₀, PP₅₀₀, PP₇₀₀ et la PP₉₀₀ respectivement, $p<.05$). Cet effet est illustré par la Figure III-4 pour un essai représentatif.

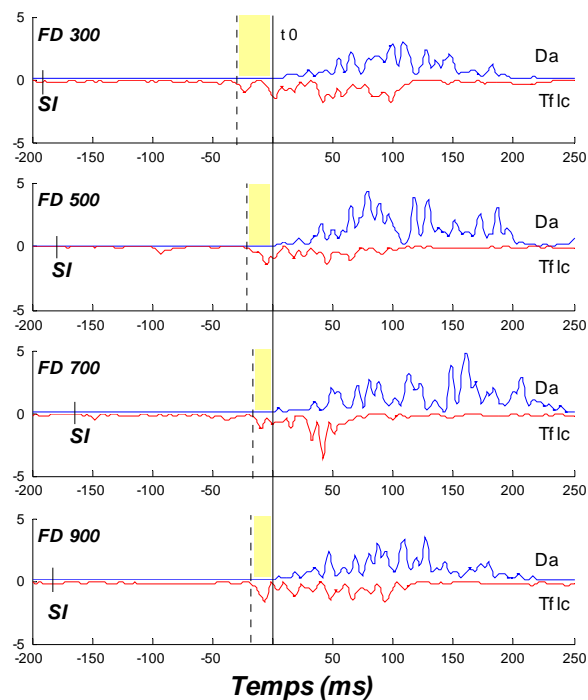


Figure III-4 : Identification de la latence des APAs au niveau du TFLc en fonction de la durée de la PP.

Des régressions linéaires ont été utilisées pour analyser la coordination temporelle entre le temps prémoteur et le temps séparant le début d'activité du TFLc du SI (cf. Figure III-4, page 72). Ces corrélations montrent que plus le temps prémoteur est important, plus le début de l'activité du TFLc est retardé ($.82 < R < .89$, $ps < .001$).

Ces résultats montrent une latence des APAs moins importante lors de la PP₇₀₀, période préparatoire correspondante à l'optimum de préparation motrice. De plus, les corrélations montrent une relation entre le temps prémoteur et le début de l'activité EMG du muscle postural.

3.4. Déplacement du CP dans la condition debout

Une analyse de variance a été utilisée afin de montrer l'existence d'un effet similaire de la durée de la PP sur le temps séparant le SI du début de variation du CP ($iniCP_x$) comme celui observé sur le temps prémoteur [$F_{(3,21)}=7.8$, $p < .001$]. Le début du déplacement du CP apparaît plus tôt en condition PP₇₀₀ par rapport aux conditions PP₃₀₀ et PP₅₀₀ (156.9 ± 26.2 ms

vs. 184.2 ± 17.9 ms et 177.4 ± 9.1 ms, respectivement, $ps < .05$). Ce laps de temps augmente par la suite en condition PP_{900} atteignant 175.1 ± 14.1 ms ($p < .05$). Il existe une corrélation entre le temps prémoteur et cette variable, plus le temps prémoteur est important, plus *iniCP_x* est important ($.57 < R < .86$, $ps < .05$, cf. Figure III-5, page 72).

Ensuite, une analyse de variance a été utilisée sur le ΔCP_{t_0} afin d'observer les effets des APAs au niveau du déplacement anticipé du CP. On observe un effet principal de la durée de la PP sur ce déplacement [$F_{(3,21)}=5.4$, $p < .01$]. Il apparaît comme étant plus important lors de la PP_{300} que la PP_{700} (-3.5 ± 1.8 vs. -0.6 ± 1.7 mm, $p < .01$). Cet effet disparaît lors de l'analyse du $\Delta CP_{arrière}$ et du ΔCP_{total} . Aucun effet de la durée de la PP n'a été observé sur ces deux variables ($[F_{(3,21)}=1.4$, $p > .10$] [$F_{(3,21)}=1.4$, $p > .10$], respectivement).

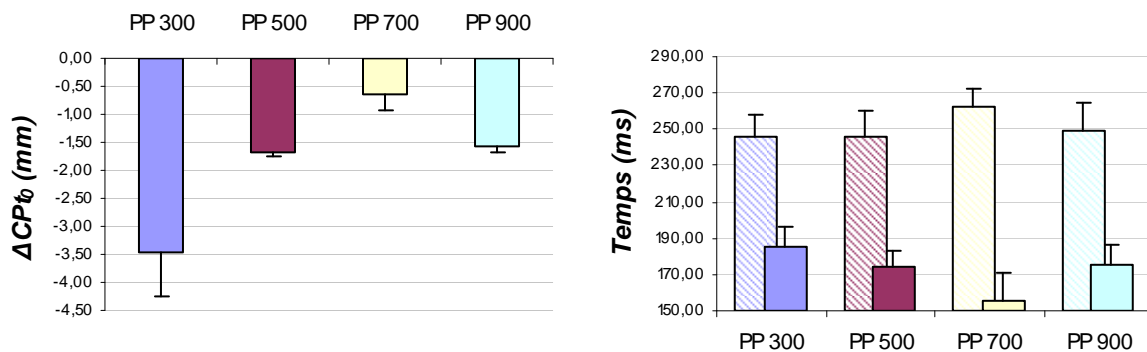


Figure III-5 : Variables issues du déplacement du CP en fonction de la durée de la PP.

Le graphique de gauche représente le déplacement anticipé du CP à t_0 (ΔCP_{t_0}). Le graphique de droite représente la variable *iniCP_x* (histogrammes pleins) et la variable *tCP_{arrière}* (histogrammes hachurés).

Malgré une absence de variation d'amplitude du $\Delta CP_{arrière}$, un effet simple a été observé sur le *tCP_{arrière}* [$F_{(3,21)}=3.7$, $p > .05$]. L'analyse post-hoc montre un temps supérieur pour atteindre le pic maximal arrière lors de la PP_{700} par rapport à la PP_{300} et la PP_{500} (262.1 ± 20 ms, 246.3 ± 16.2 ms et 245.7 ± 24.1 ms, respectivement, $ps < .05$).

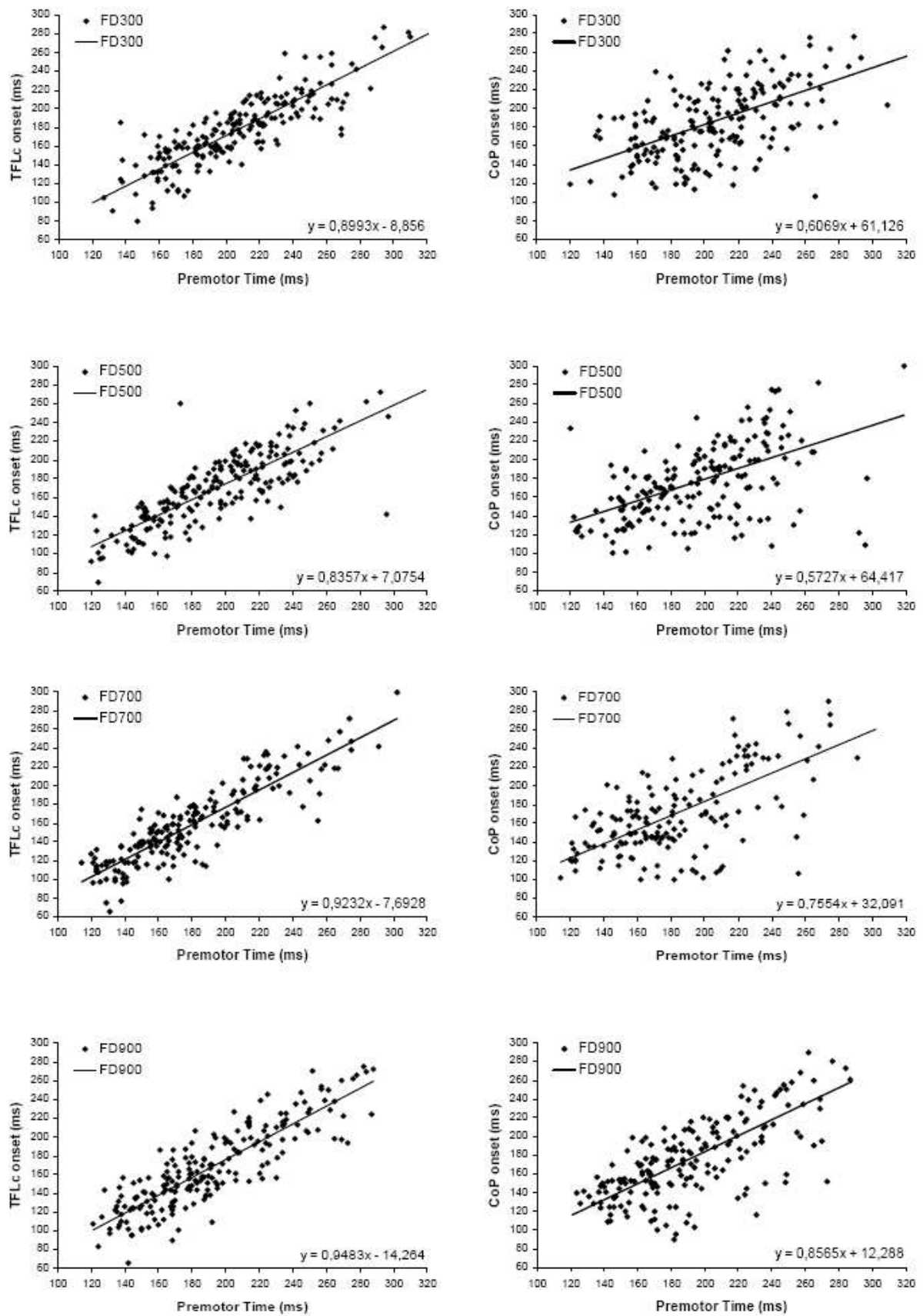


Figure III-6 : Corrélations entre le temps prémoteur et 1) le début de l'activité du TFLc et 2) le début du déplacement du CP grâce à la variable INCP.

Ces résultats montrent une sensibilité temporelle de la réponse posturale face à la modification de la durée de la PP. Lors de la PP₇₀₀, la diminution du ΔCP_{t_0} ne serait qu'une conséquence d'un retard d'anticipation, engendrant un délai supplémentaire pour atteindre $\Delta CP_{arrière}$, d'amplitude similaire aux autres durées de la PP.

4. DISCUSSION

4.1. Impact de la période préparatoire sur le temps prémoteur

L'objectif de cette étude était de vérifier l'hypothèse selon laquelle il existerait un optimum de préparation différent lors de la production d'un mouvement en fonction de la condition posturale (*Assis vs. Debout*).

Plusieurs expérimentations utilisant un paradigme de presse-bouton ont montré une augmentation du TR avec l'allongement de la PP lorsque celle-ci varie à l'intérieur d'un bloc d'essais (Bertelson, 1967 ; Bertelson et Tisseyre, 1968 ; Posner et Boies, 1971 ; Tandonnet et al., 2003). Ce résultat a classiquement été interprété par une manifestation des processus de préparation (Requin et al., 1991). Quelques variables physiologiques ont permis de montrer que la durée de la PP peut influencer les structures corticales (processus centraux) et spinales (processus périphériques) (Hasbroucq et al., 1999). Cependant, avant l'apparition des méthodes d'analyse non invasives telles que la Stimulation Magnétique Transcraniène (SMT) ou l'étude des potentiels évoqués, il était impossible de montrer que les processus centraux étaient responsables d'une diminution du TR. Néanmoins, utilisant le profil d'accélération du bras et des données EMG issues du muscle responsable du mouvement, il a été possible de dissocier la composante centrale de la composante périphérique du TR, c'est-à-dire, le temps prémoteur et le temps moteur. Concernant l'effet de la durée de la PP sur ces deux composantes, Hasbroucq et al. (1999) ont observé un effet de la durée de la PP sur le temps moteur, ce qui suggère que le taux de recrutement des unités motrices et donc les processus moteurs périphériques dépendent de la préparation temporelle. Les résultats obtenus par ces auteurs montrent que l'amplitude du réflexe H⁹, mesuré au niveau de la main, diminuait avec

⁹ Ce réflexe est basé sur le circuit myotatique monosynaptique. Le réflexe H est une stimulation électrique d'un nerf à un niveau qui excitera principalement les fuseaux musculaires des afférences primaires (groupe Ia) qui ont des connections mono- et polysynaptiques sur les autres motoneurones. Il informe sur les modulations présynaptiques des réflexes ce qui permet de déterminer les voies empruntées en fonction d'une perturbation. Il permet de déterminer les effets des fuseaux neuro-moteurs (action des motoneurones γ (gamma)) sur les afférences musculaires. Ils sont mesurés grâce à l'analyse EMG : on observe un changement dans l'amplitude du signal EMG rectifié ce qui représente la réponse neurale nette intégrée, c'est-à-dire la mesure directe de la sortie motrice.

l'augmentation de la PP, suggérant ainsi que la préparation est le résultat simultané de l'augmentation d'une inhibition présynaptique et d'une réduction de l'excitabilité de la voie cortico-spinale. D'un autre côté, Tandonnet et al. (2003), dans une tâche de TRC, ont montré que la préparation temporelle affectait autant le temps prémoteur que le temps moteur. La littérature classique concernant l'effet de la PP sur le TR montre une évolution sous la forme d'une chaînette (courbe en U), lorsque la durée de la PP est courte (inférieure à 2 sec). Ainsi, ces auteurs ont pu identifier une période préparatoire optimale de l'ordre de 500 ms, induisant le TR le plus court (Posner et Boies, 1971). Cet optimum de préparation n'évoluerait pas selon le mode de préparation neutre ou spécifique (Bertelson, 1967 ; Bertelson et Tisseyre, 1968). Cependant, l'augmentation du TR à la suite de cet optimum semble montrer une incapacité à maintenir un niveau de préparation optimal sur une longue période suggérant un processus passif (Woodrow, 1914 ; Posner et Boies, 1971 ; Niemi et Näätänen, 1981 ; Mattes et Ulrich, 1997). Les résultats de notre expérience sur le temps prémoteur et le TR confirment cet optimum de préparation de 500 ms lors d'une préparation sélective d'un mouvement d'élévation d'un bras en condition *Assis*. Plus précisément, la variation du TR provient d'une modification du temps prémoteur uniquement, ce qui suggère un impact de l'effet de la PP sur la composante centrale.

Lorsque l'élévation du bras est exécutée en position *debout*, nos résultats montrent une augmentation de l'optimum de préparation à 700 ms. Deux hypothèses peuvent être formulées en fonction de la présence ou de l'absence d'APAs dans la condition *assis*. Si les APAs sont absents lors de la condition *assis* (Van der Fits et al., 2001), alors l'augmentation de l'optimum de préparation à 700 ms proviendrait d'une planification du mouvement intégrant ses conséquences posturales, c'est-à-dire, les APAs. Cependant, il a été montré que les APAs pouvaient être présents dans la position *assis* (Teyssède et al., 2000 ; Aruin et al., 2003). Cependant, les travaux de Van der Fits et de Teyssède font état de la présence d'APAs concomitants à un mouvement du bras. Ces APAs suivraient une synergie proximo-distale et permettraient la stabilisation des segments posturaux les plus près de la perturbation posturale avant les segments les plus éloignés (stabilisation du tronc en priorité). Cette synergie est inversée par rapport à la condition *debout*. Nous assistons généralement à une activation des muscles croisant la cheville, le bassin puis le tronc (Bouisset et al., 1981). Ainsi, l'augmentation de l'optimum de préparation observé dans notre étude pourrait dépendre de la synergie utilisée et donc de la priorité des segments à stabiliser. Nos résultats iraient plutôt dans le sens d'un temps additionnel nécessaire pour la planification de la commande posturale

et focale pour être préparées de manière optimale. En effet, quel que soit l'optimum de préparation dans les deux conditions posturales (500 ms assis et 700 ms debout), le temps prémoteur est similaire, environ 175 ms. Par conséquent, la période préparatoire optimale pourrait dépendre de la condition posturale.

4.2. Modification temporelle des APAs en situation debout

Cette étude réplique les principaux résultats observés sur l'effet du mode de déclenchement (tâche de TRS) sur les APAs (Benvenuti et al., 1997 ; De Wolf et al., 1998 ; Nougier et al., 1999 ; Slijper et al., 2002). L'analyse sur le temps de latence des APAs montre un effet significatif de l'influence de la durée de la PP. Le début de l'activité posturale du TFLc montre une synchronisation avec le début de l'activité du muscle responsable du mouvement focal : les APAs sont plus faibles lors de la PP₇₀₀ que lors de la PP₃₀₀. De plus, au regard des corrélations effectuées, il semble que le début de l'activité du TFLc soit dépendant de la longueur du temps prémoteur. Ces résultats suggèrent que le SNC serait capable d'utiliser avantageusement la PP pour programmer la commande posturale. En d'autres termes, le temps de programmation de la commande posturale ne serait pas affecté uniquement par le temps prémoteur comme le suggèrent Slijper et al. (2002) mais aussi par la durée de la PP.

4.3. Interaction posture/mouvement en fonction de la PP

Nos résultats concernant l'évolution du temps prémoteur, de l'initiation du déplacement du CP ($iniCP_x$) et de la latence des APAs associés aux différentes corrélations suggèrent que la commande posturale est temporellement dépendante de la commande focale (Lee, 1980 ; Massion, 1992). Le temps prémoteur est le plus court lors de la PP₇₀₀ et la latence des APAs semble dépendante de ce temps, il est raisonnable de penser que cela produise un faible déplacement du CP lors de l'activation du muscle responsable du mouvement (ΔCP_{t_0}). Puisque l'intensité de la commande en Feedforward n'est pas modifiée suivant la durée de la PP ($\Delta CP_{arrière}$ et ΔCP_{total} ne variant pas), elle est retardée dans le temps de manière à être plus synchronisée par rapport au mouvement focale. Il s'ensuit un plus faible ΔCP_{t_0} et un temps plus important pour atteindre le déplacement maximal arrière du CP ($tCP_{arrière}$).

Une première explication à ce phénomène tiendrait dans une préparation des APAs en fonction du temps impartie par le temps prémoteur comme le suggèrent Brown et Frank

(1987). La préparation des APAs retarderait l'apparition du mouvement par une inhibition de la commande focale. Une seconde explication pourrait provenir d'une stratégie de co-contraction avant le mouvement. Les travaux de Latash (2000) montrent dans une tâche d'oscillation du coude, l'ordre de recrutement proximo-distal pour effectuer cette tâche est observé pour des temps prémoteurs longs alors qu'une activation plus simultanée des muscles est observée pour des temps prémoteurs relativement courts. Les travaux de De Wolf et al. (1998) semblent corroborer ces résultats dans le domaine postural puisqu'ils trouvent une diminution du temps séparant le début d'activation des Erector Spinae et de son antagoniste, le Rectus Abdominis avec la diminution du TR. En conséquence, les sujets pourraient gagner du temps pour préparer et générer une commande posturale concomitante à l'apparition du mouvement, en vue de réagir le plus vite possible. En d'autres termes, il existerait un compromis entre les commandes focale et posturale. En dépit d'APAs plus faibles, les performances du sujet au niveau du temps prémoteur sont meilleures lors de la PP₇₀₀.

4.4. Mécanismes centraux de la commande des ajustements posturaux

Plusieurs auteurs ont suggéré que les APAs reflétaient un processus central relativement indépendant de celui utilisé pour la production du mouvement focal (Benvenuti et al., 1997 ; De Wolf et al., 1998 ; Nougier et al., 1999 ; Slijper et al., 2002). Cependant, De Wolf et al., n'excluent pas l'existence d'une stratégie dépendante du TR, où la latence des APAs serait corrélée avec la longueur du TR. Cette stratégie supporterait le modèle hiérarchique de la coordination entre la posture et le mouvement. Selon ce modèle, il existerait une seule et même commande centrale, celle du mouvement avec une collatérale agissant sur le contrôle postural (Massion, 1992). Les résultats issus de cette expérimentation supporteraient mieux ce modèle. Avec l'augmentation du temps prémoteur, les APAs seraient plus anticipés conduisant à une augmentation du déplacement anticipé du CP. Cette plus grande anticipation conduirait à une atteinte plus rapide du pic du déplacement maximal arrière du CP. Ces résultats suggèrent une capacité du SNC à moduler dans le temps la commande posturale (Feedforward) en fonction de la durée de la PP et d'utiliser une stratégie moins coûteuse pour le système. Ceci laisse supposer l'existence d'une interdépendance entre la programmation de la posture et celle du mouvement.

En conclusion, cette expérience 1) confirme l'existence d'une période préparatoire optimale différente en fonction de la condition posturale, et 2) suppose l'existence d'une

modulation temporelle dans l'organisation centrale des commandes focale et posturale en fonction de la durée de la PP.

CHAPITRE IV: AUGMENTATION DE LA PÉRIODE PRÉPARATOIRE OPTIMALE EN FONCTION DE LA COMPLEXITE POSTURALE LORS D'UNE PRÉPARATION NEUTRE¹⁰.

1. INTRODUCTION

Nous avons montré dans le chapitre précédent l'existence d'une interaction entre la durée de la PP et la condition posturale sur le temps prémoteur suggérant ainsi une prise en compte des contraintes posturales dans la préparation de la tâche posturo-cinétique. Cependant, cette augmentation de l'optimum de préparation peut être considérée comme dépendante de la production d'APAs si et seulement si ces APAs sont absents lors de la position assise. S'ils sont présents, cet optimum dépendrait d'une complexité globale de la réponse motrice et non d'une planification anticipée des APAs. Par ailleurs, la préparation sélective est connue pour faciliter le traitement du signal impératif qui est compatible avec le signal préparatoire (Olivier et Rival, 2002). En d'autres termes, cela favorise le processus de sélection de la réponse. La connaissance du mouvement à produire permettrait d'engager une préprogrammation du mouvement requis et des APAs associés durant la PP.

Cette présente étude tente d'analyser les variables précédentes lors d'une préparation neutre. Ce type de préparation consiste en la présentation d'un signal préparatoire non informatif, qui, espacé par une PP, est suivi par un signal impératif donnant une information sur le mouvement à produire. Par conséquent, la préparation du sujet consisterait simplement à augmenter son niveau d'alerte en vue de la réponse à produire. L'utilisation d'une telle préparation ne donnerait pas la possibilité au sujet de préprogrammer le mouvement et les APAs durant la PP. Par conséquent, si la durée de la PP optimale est identique en condition debout quel que soit le type de préparation (neutre ou sélective), nous pourrions conclure que l'augmentation de la PP optimale observée de la condition *Assis* à la condition *Debout* est due à une contrainte posturale plus importante. Enfin, Si nous retrouvons les APAs les plus faibles lors de la durée de PP optimale, cela tendrait à supposer une coordination identique entre la commande focale et posturale indépendamment de l'incertitude événementielle. Le SNC serait alors capable de moduler dans le temps le début de la commande posturale en fonction du temps prémoteur.

¹⁰ Ce chapitre correspond à un article soumis dans *Experimental Brain Research*.

L'objectif de cette étude est donc dans un premier temps d'analyser les contraintes posturales des positions *Assis* et *Debout* et d'analyser la coordination posture/mouvement lors d'une préparation neutre. Nous supposons 1) une contrainte posturale en condition *debout* plus importante qu'en condition *assis* générant des APAs plus anticipés, 2) une PP optimale identique à la préparation sélective en condition *debout* suggérant que l'augmentation de la PP optimale ne dépend pas uniquement de la présence des APAs mais d'une tâche intégrant une gestion de l'équilibre postural plus complexe, et 3) puisque l'effet de la durée de la PP se situerait au niveau du stade des ajustements moteurs, la nature de la préparation (influençant l'incertitude événementielle) ne modifierait pas la relation temporelle de la coordination entre la posture et le mouvement en condition *debout*.

2. METHODE

2.1. Sujets

Treize sujets masculins droitiers, sans antécédent moteur ou neurologique (âge moyen 23 ± 2.35 ans de poids 72.5 ± 7.6 Kg et de taille 176 ± 8.2 cm) ont participé à l'expérimentation.

2.2. Matériel

Le matériel utilisé n'est pas différent de la première expérimentation. Cependant, la chaise était fixée sur une planche (80×60 cm) solidaire de la plate-forme de force (AMTI OR-6) afin de pouvoir analyser les déplacements du CP dans la condition *Assis*. Une marque sur la planche a permis de standardiser la position des pieds pour tous les sujets. La position initiale des bras dans les deux conditions posturales était le long du corps, les mains supinées à 90° , les paumes se faisant face. La plate-forme de force a permis d'enregistrer les forces et les moments dans les trois plans de l'espace (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y et M_z), M_x étant dans le plan sagittal, M_y dans le plan frontal et M_z dans le plan horizontal. Des électrodes bipolaires ont été ajoutées par rapport à la première expérimentation au niveau des *Erector Spinae* (ES), des *Tenseur du Fascia Latae* (TFL) et des *Biceps Femoris* (BF) ipsilatéral et controlatéral au mouvement. Le début de l'activité du *Deloïdus Anterior* (DA) a été considéré comme le muscle responsable du mouvement (t_0). Ces électrodes de surface ont été positionnées à 3 cm l'une de l'autre et le signal recueilli a été filtré avec une bande passante de 50 à 400 Hz.

Une LED (\varnothing .8 cm) a été ajoutée sur la planche et placée au milieu des deux autres. Les poids placés au niveau des poignets étaient toujours de 1kg. Les accéléromètres n'étant plus disponibles, deux presse-boutons au niveau des deux mains ont été placés sur les cuisses et au niveau de la chaise, suivant la condition posturale et reliés à un ordinateur. Un relâchement des boutons avec la tranche de la main permettait de visualiser l'instant du début du mouvement. La cordelette élastique placée à hauteur des épaule, présente lors de la première expérimentation a été équipée d'une bande aluminium. Un anneau en fer était placé à 1 mm au dessus de la cordelette et relié à l'ordinateur. Lorsque la main touchait la cordelette, la bande aluminium rentrait en contact avec l'anneau. Ce système permettait d'estimer le temps « fin du mouvement ».

Tous les signaux ont été enregistrés à une fréquence de 1000 Hz avec une résolution de 12 bits/s. Le système Datac a permis de contrôler l'expérimentation et de synchroniser les signaux issus des différents capteurs.

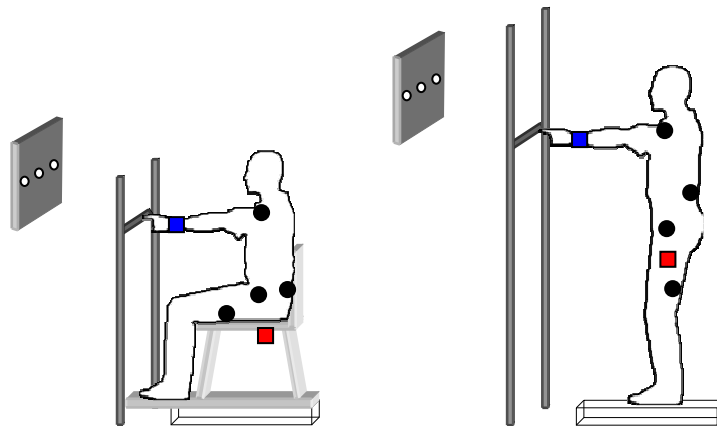


Figure IV-1: Illustration du matériel et de la procédure utilisés.

Exécution de l'élévation d'un bras à l'horizontale dans les deux conditions posturales. Les **carrés bleus** représentent le poids placé au niveau de chaque poignet du sujet. Les sujets étaient placés sur une plate forme de force avec un enregistrement électromyographique du DA du TFL et du BF ipsilatéral et controlatéral au mouvement (**cercle noir**). Noter la planche fixée sur la plate-forme de force en condition *assis*. On peut observer dans cette situation une augmentation très importante de la base de sustentation par rapport à la condition debout. La présence de boutons (**carrés rouges**) et de la cordelette permet de mesurer le temps de mouvement.

2.3. Procédure et conditions expérimentales

Les deux facteurs testés lors de la première expérimentation ont été manipulés : la condition posturale (*Assis* vs. *Debout*) et la durée de la PP (PP₃₀₀, PP₅₀₀, PP₇₀₀ et PP₉₀₀).

Les instructions étaient de réaliser l'élévation d'un bras jusqu'à la cordelette le plus rapidement possible. Une fois la posture stabilisée, la tranche des deux mains appuyée sur les boutons respectifs, le sujet devait élever le bras à l'horizontale en réponse à deux signaux visuels, un signal préparatoire (SP) et un signal impératif (SI). Cette expérience utilise une **préparation neutre**, c'est-à-dire *qu'aucune information durant le SP n'est donnée au sujet sur l'effecteur qui réalisera le mouvement (élévation du bras droit ou du bras gauche)*. Ce signal préparatoire était donc constitué de l'allumage en rouge des 3 LEDs présentes sur la cible visuelle pendant 100 ms. Après ce SP suivait un temps de 200, 400, 600 ou 800 ms constituant, avec le temps d'allumage du SP, une PP de 300, 500, 700 ou 900 ms. Ensuite apparaît le SI, l'allumage dans la couleur verte d'une des deux LED excentrique correspondant au côté de l'élévation du bras à effectuer. Les sujets devaient donc élever le bras correspondant le plus rapidement possible après le SI et le maintenir jusqu'au signal auditif « OK ». Les sujets devaient conserver le bras non utilisé pressé contre le bouton correspondant. L'élévation du bras droit et gauche était équiprobable dans chaque condition posturale et chaque durée de PP.

Comme l'expérimentation précédente, les différentes durées de la PP ont été présentées dans des blocs d'essais différents, mais aléatoirement dans chaque condition posturale. Chaque bloc était composé de 50 essais, espacés dans le temps de 5 sec. Le temps de repos entre chaque était de 2 min approximativement. Deux essais d'entraînement avant chaque bloc ont été réalisés par les sujets.

2.4. Analyses des Données

Les données ont été analysées grâce au logiciel Matlab. Les signaux EMG ont été rectifiés et filtrés avec un filtre passe-bas Butterworth de 100 Hz et d'ordre 2. Les données issues de la plate-forme de force ont été filtrées avec un filtre identique de fréquence de coupure 10 Hz.

2.4.1. Analyse électromyographique

Le début de chaque activité électromyographique des muscles a été déterminé avec le même algorithme que celui de l'expérience précédente : le premier point au dessus du seuil de la moyenne + 2 écart-types par rapport à l'activité basale, et ce, pendant les 30 ms suivantes. Comme précédemment, une correction visuelle a été faite lorsque cela s'avérait nécessaire.

Les essais ont été synchronisés grâce au début de variation de l'activité du *deltoïdus Anterior* (t_0). Grâce à ce t_0 et au bouton de la main, nous avons pu dissocier le temps préMOTEUR du temps MOTEUR. Les essais avec un temps préMOTEUR inférieur à 120 ms et supérieur à 320 ms ont été rejetés (environ 2 par bloc maximum).

Afin de quantifier la latence temporelle, chaque début d'activation d'un muscle postural a été calculé par rapport à t_0 . Une valeur négative indiquait une activation anticipée du muscle postural considéré.

Afin de quantifier l'activité EMG du muscle postural, le signal a été intégré sur une fenêtre de -100 à +100 ms par rapport à t_0 ($\int EMG_{total}$). L'activité basale du muscle considéré a été intégrée sur une fenêtre de -200 à -150 ms par rapport à t_0 ($\int EMG_{b(50)}$). L'activité EMG nette du muscle est analysée grâce au calcul suivant :

$$\int EMG = \int EMG_{total} - 4 * \int EMG_{b(50)} \quad \text{Équation 3}$$

Afin de comparer $\int EMG$ entre les sujets, la valeur maximale pour un muscle donné, toutes conditions confondues, a été ramenée à la valeur 1. Toutes les autres valeurs ont été normalisées par rapport à cette valeur maximale. Noter que cette méthode limite l'indice $\int EMG$ à 1.

2.4.2. Analyse du mouvement

Grâce aux boutons au niveau de la chaise ou de la cuisse (dépendant de la condition posturale) et à la cordelette servant de contacteur, nous avons obtenu le temps de mouvement.

2.4.3. Analyse des données issues de la plate-forme de force

Nous avons calculé le déplacement du CP dans l'axe antéro-postérieur ΔCP_y (cf. équation 2, page 66) où ΔM_x a été calculé par rapport à la valeur de base dans la fenêtre -200 à -100 t_0 . Seule la valeur du déplacement anticipé du CP ΔCP_{t_0} (cf. page 66) a été prise en compte.

L'augmentation importante de la base de sustentation (cf. Figure IV-1, page 80) dans la position *Assis* a été prise en compte pour comparer la stabilité par rapport à la condition *Debout*. Puisque le déplacement antéro-postérieur du CP est quatre fois plus important en position *assis* (20 cm vs. 5 cm, respectivement), nous avons calculé le pourcentage moyen du

temps passé à l'intérieur de dix cercles concentriques d'incrément respectif de 20 mm et 5 mm sur une période de 600 ms après t_0 .

Le moment vertical (T_z) a été calculé de la manière suivante :

$$T_z = M_z + \Delta CP_y \cdot F_x - \Delta CP_x \cdot F_y \quad \text{Équation 4}$$

M_z est le moment vertical enregistré par la plate-forme de force, corrigé par $\Delta CP_y \cdot F_x$ et $\Delta CP_x \cdot F_y$ afin de prendre en compte la distance du sujet par rapport au centre de la plate-forme (Bleuse et al., 2002). Deux phases sont observés : une phase positive suivie par une phase négative, le sens positif correspond au sens horaire. Trois moments ont été calculés : en plus du moment maximal (M) et du moment minimal (m), le moment développé à t_0 a été calculé. De plus, cinq intervalles de temps ont été utilisés : de t_0 au début de variation du moment T_z (défini comme étant la première valeur supérieure à .5 N.m), de t_0 jusqu'au moment maximal (tM) et minimal (tm) et la durée de chaque phase positive (ΔPos) et négative (ΔNeg). Enfin, l'intégration de chaque phase a été calculée ($\int Pos$ et $\int Neg$, respectivement).

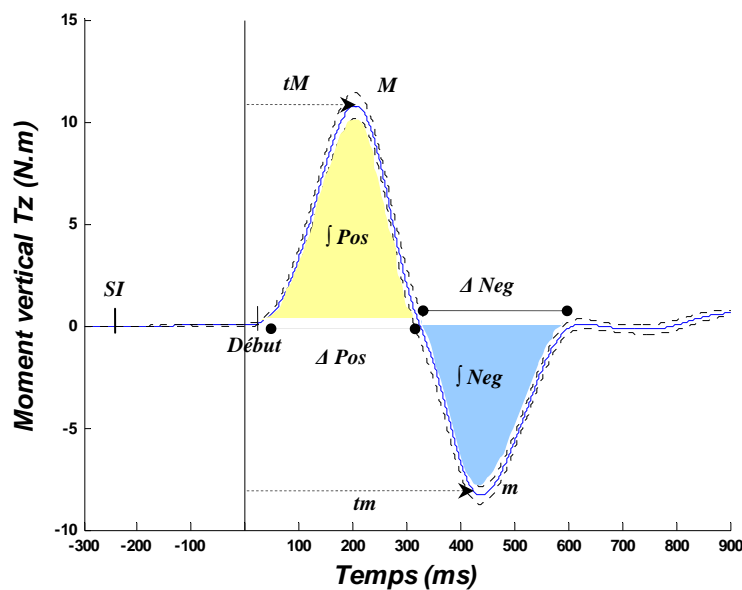


Figure IV-2 : Illustration des valeurs mesurées sur le moment vertical T_z lors de l'élevation du bras droit.

Cette courbe représente la moyenne de tous les essais. Les traits en pointillé représentent l'écart-type. Le trait vertical représente le moment d'activation du DA (t_0). Noter l'absence de moment à t_0 .

2.5. Analyse statistique

Nous avons utilisé uniquement les données issues de l'élevation du bras droit afin d'éviter tous les phénomènes liés à la latéralité, soit 25 essais par condition.

L'analyse statistique s'est faite en trois étapes. Premièrement, le *t-test* de student a été utilisé afin de comparer les deux conditions posturales (*Assis* vs. *Debout*). Ensuite, une analyse de variance ANOVA à deux facteurs : Condition posturale (*Assis* vs. *Debout*) × durée de la PP (300, 500, 700 et 900 ms) a été utilisée sur les variables issues du mouvement focal : le temps pré-moteur et le temps de mouvement. Enfin, une analyse de variance à un facteur (4 durées de la PP) a permis d'analyser les variables posturales dans la condition *Debout*. Le test post-hoc et le niveau de significativité ont été conservés par rapport à la première expérimentation (Tukey (HSD) et $p < .05$, respectivement).

3. RESULTATS

3.1. Respect des consignes

Avant toute chose, nous avons vérifié si tous les mouvements étaient exécutés sans modification de la vitesse, quel que soient les conditions. L'analyse du temps de mouvement ne montre aucun effet significatif de la condition posturale [$F_{(1,12)}=1.4$, $p > .10$] et de la durée de la PP [$F_{(3,36)}=2.5$, $p > .05$], ce qui suggère un maintien de la vitesse d'exécution du mouvement dans les différentes conditions expérimentales.

3.2. Différence posturale Assis vs. Debout

3.2.1. Effets de la condition posturale sur le pattern général des APAs

La figure IV-3 (page 85) représente le tracé EMG des différents muscles enregistrés pour un sujet élevant le bras droit. Afin de comparer la latence temporelle de différents muscles en fonction de la condition posturale, un *t-test* de student a été utilisé. Des APAs ont été observés dans la condition *Debout* au niveau des muscles suivants par rapport à la condition *Assis*: ES ipsilatéral et controlatéral (-5.9 ± 13.1 ms vs 17.7 ± 13.6 ms et -8.2 ± 9.5 ms vs 17.9 ± 10.9 ms), TFL controlatéral (-15.6 ± 12.7 ms vs 133.1 ± 24.7 ms) et BF ipsilatéral (-34.2 ± 14.8 ms vs 0.3 ± 13.9 ms), respectivement ($ps < .001$). De plus, le début d'activation du BFc apparaît plus tôt dans la condition *Debout* par rapport à la condition *Assis* (64.8 ± 22.2 ms vs 120.5 ± 36.9 ms, respectivement, $p < .001$). Il est à noter une différence dans la séquence d'activation musculaire en fonction de la condition posturale. Une activation inversée du TFLi et du TFLc apparaît. Une activation anticipée du TFLi est présente lors de la

condition *Assis* alors que l'activation anticipé dans la condition *Debout* apparaît au niveau du TFLc (-10.1 ± 16.1 ms vs. 133.1 ± 24.7 et 92.2 ± 36.6 ms vs. -15.6 ± 12.7 ms, respectivement $p < .001$).

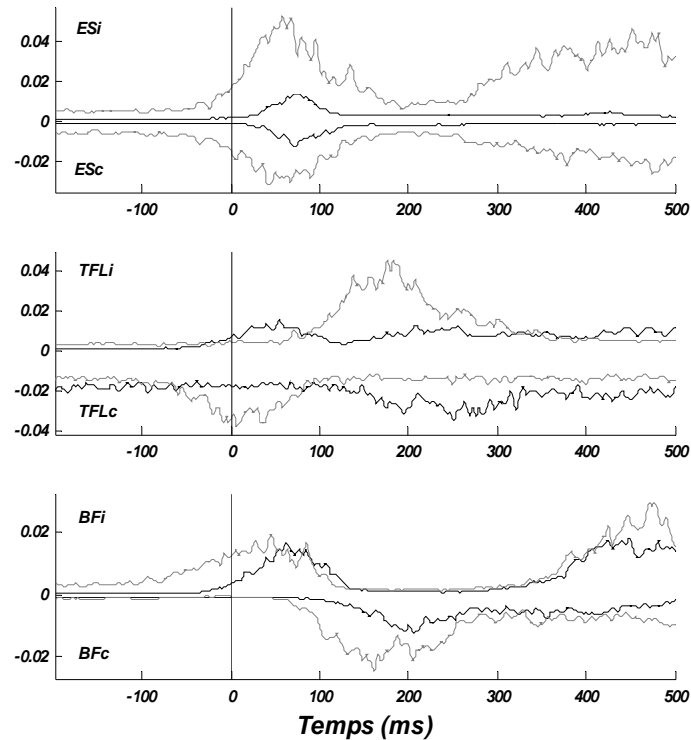


Figure IV-3 : Illustration des tracés EMGs des muscles posturaux lors de l'élevation du bras droit en fonction de la condition posturale.

Enregistrement EMG des muscles Erecteur Spinae (ES), Tenseur du Fascia Latae (TFL) et du Biceps Femoris (BF) ipsilatéral et controlatéral au mouvement, notée i et c dans les deux conditions posturales *Assis* (tracé noir) *Debout* (tracé gris). Une activation anticipée de la synergie posturale en condition *Debout* avec une intensité plus importante est observée.

La quantification de l'activité EMG des différents muscles posturaux montre un t-test significatif au niveau de l'activité basale $\int EMG_{b(50)}$ en fonction de la condition posturale (cf. Figure IV-4, page 86). L'activité de base des muscles ESi, ESs, BFi et BFc augmente dans la position *Debout* par rapport à la condition *Assis* ($p < .01$). Aucune différence n'est observée au niveau du TFLi et TFLc ($p > .5$). Le t-test de student montre aussi un effet significatif sur l'activité nette $\int EMG$ des muscles ESi, ESs, TFLc, BFi et BFc (cf. Figure IV-4, $p < .01$). Cependant aucune augmentation au niveau du TFLi n'apparaît dans la condition *Debout* par rapport à la condition *Assis*.

Ces résultats montrent une modification du pattern des APAs en fonction de la condition posturale avec une augmentation de la latence et de l'intensité des ajustements posturaux qu'ils soient anticipés ou consécutifs au mouvement.

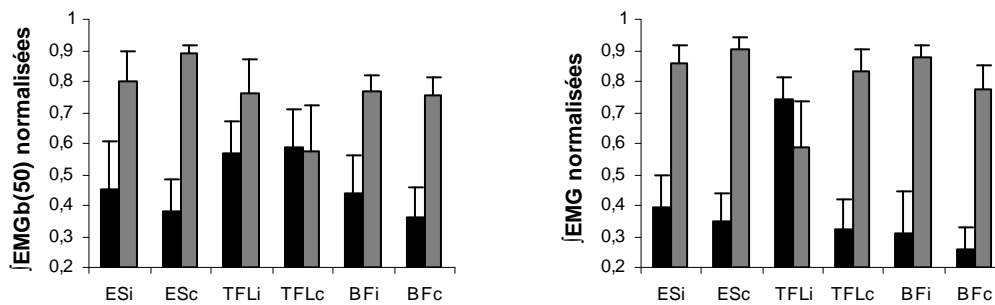


Figure IV-4 : Intégration de l'activité basale et de l'activité nette des différents muscles posturaux.

3.2.2. Condition posturale et stabilité

L'augmentation de la base de sustentation dans la condition *Assis* ne permet pas de comparer directement les déplacements du CP entre les deux conditions posturales. En effet, l'augmentation de cette base induit un moment M_y et M_x supérieur grâce à l'augmentation du bras de levier, c'est-à-dire, le déplacement du CP. Pour chaque condition posturale, l'amplitude maximale du déplacement du CP a été divisée en 10 anneaux concentriques avec un incrément de 20 mm et 5 mm représentant 10 % du déplacement maximal dans la condition *Assis* et *Debout*, respectivement (cf. Figure IV-5, page 87). L'analyse de variance à deux facteurs (2 conditions posturales \times 10 anneaux concentriques) du pourcentage du temps passé à l'intérieur d'une zone montre une interaction significative [$F_{(9,108)}=11.6$, $p<.001$]. Les sujets passent plus de temps dans les deux première zones dans la condition *Assis* par rapport à la condition *Debout* (50% vs. 35%, respectivement). Inversement, les sujets passent plus de temps vers les limites de la base de sustentation dans la condition debout.

Une plus grande instabilité est observée en condition Debout par rapport à la condition Assis au regard du temps passé pour atteindre 20 % du déplacement maximal du CP pour chaque condition posturale (50% vs. 35%).

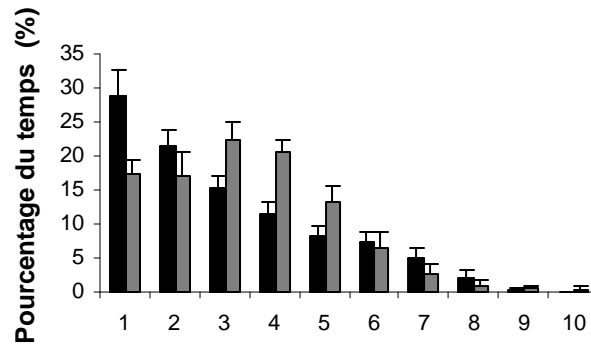


Figure IV-5 : Pourcentage du temps passé à l'intérieur de 10 anneaux concentriques.

Les histogrammes noirs représentent la condition assise alors que les histogrammes gris représentent la condition *Debout*. Environ 28 % du déplacement du CP se fait dans la zone 1, représentant un cercle de diamètre de 20 mm dans la condition *Assis*, alors que seulement 18 % du temps, le CP reste dans une zone de 5 mm dans la condition *Debout*. La zone 1 représente 10% du déplacement maximal du CP pour les deux conditions. Noter que le temps diminue en fonction de l'augmentation de la zone dans la condition *Assis* par rapport à la condition *Debout*.

3.3. Effets de la PP sur le temps préMOTEUR

Une analyse de variance à deux facteurs (2 conditions posturales \times 4 durées de la PP) a été réalisée sur le temps préMOTEUR afin d'observer des différences au niveau de l'optimum de préparation en fonction de la condition posturale (cf. Figure IV-6, page 88). Les résultats montrent un effet significatif de la condition posturale [$F_{(1,12)}=6.7$, $p<.05$] et de la PP [$F_{(3,36)}=7.6$, $p<.001$]. L'interaction condition posturale \times PP est aussi significative [$F_{(3,36)}=3.7$, $p<.05$]. Dans la position *Assis*, le temps préMOTEUR diminue de la condition PP₃₀₀ à la condition PP₅₀₀ et augmente ensuite dans la condition PP₉₀₀ (192.9 ± 23.7 ms, 182.1 ± 23.7 ms, 198.3 ± 26.9 ms, $p=.05$ et $p<.001$, respectivement). Dans la position *Debout*, le temps préMOTEUR diminue de la condition PP₃₀₀ à la condition PP₇₀₀ (202.9 ± 26.4 ms vs. 190.8 ± 22.6 ms, respectivement, $p<.05$). L'optimum de préparation semble se décaler de 500 ms à 700 ms (*Assis* vs. *Debout*, respectivement). Noter une augmentation du temps préMOTEUR lors de l'optimum de préparation *Debout* par rapport à l'optimum de préparation *Assis* (environ 182 ms vs. 191 ms, respectivement $p<.05$).

Ces résultats montrent un décalage de l'optimum de préparation neutre en condition Debout par rapport à la condition Assis avec un décalage du temps préMOTEUR minimum qui lui est associé.

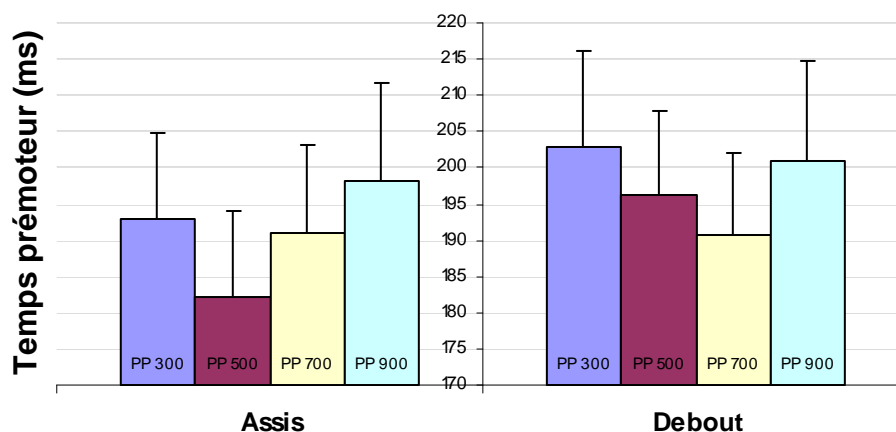


Figure IV-6 : Évolution du temps pré-moteur en fonction de la condition posturale et de la PP.

On observe un décalage de l'optimum de préparation à 700 ms dans la condition debout (gris) avec une augmentation du temps pré-moteur par rapport à l'optimum de préparation dans la condition assise (noir).

3.4. Effets de la PP sur les APAs en condition *Debout*

3.4.1. Données électromyographiques

L'analyse de variance à un facteur (4 PPs) sur le début d'activation des muscles posturaux par rapport à t_0 montre un effet significatif au niveau de ESi [$F_{(3,36)}=3.3$, $p<.05$], ESc [$F_{(3,36)}=3.4$, $p<.05$] et TFLc [$F_{(3,33)}=2.4$, $p<.05$]. La latence de ces APAs est réduite dans la condition PP₇₀₀ par rapport à la PP₃₀₀. Par contre, l'analyse concernant TFLi BFi et BFc n'est pas concluante ($p=.09$, $p=.19$ et $p=.16$, respectivement).

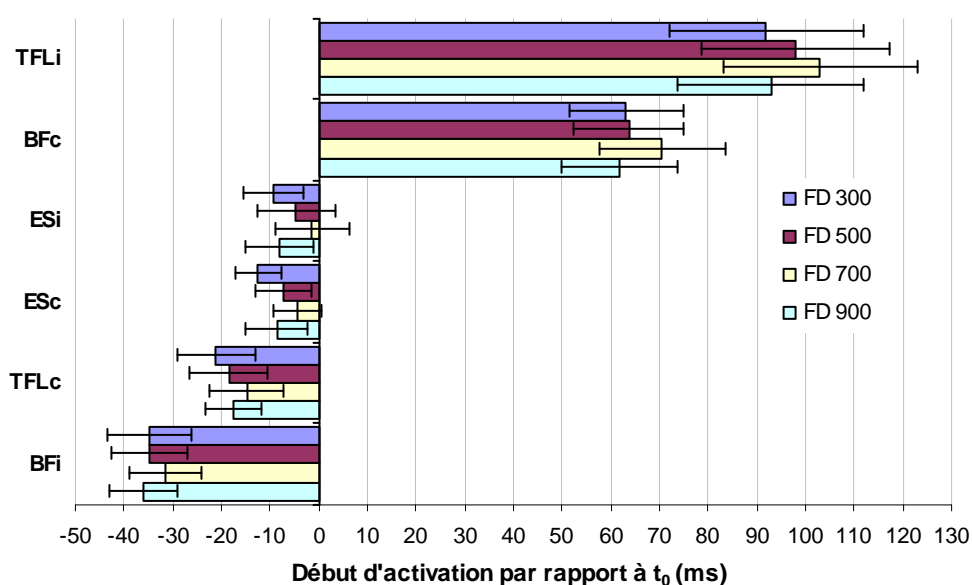


Figure IV-7 : Début d'activation des muscles posturaux par rapport à t_0 , en fonction de la PP.

Des régressions linéaires ont été utilisées afin d'examiner la coordination temporelle entre le temps pré-moteur et la latence des APAs observés. Les résultats montrent des corrélations faibles mais néanmoins significatives entre le temps pré-moteur et la latence des APAs pour les muscles ESi ESc TFLc et BFi ($0.12 < R < 0.41$, respectivement, $ps < .05$).

3.4.2. Données de la plate-forme de force

Aucun effet significatif n'a été observé sur le déplacement anticipé du CP ΔCP_y , [$F_{(3,36)}=1.9$, $p > .10$], ceci probablement à cause d'une variabilité importante du déplacement du CP d'un essai à l'autre. Ce déplacement du CP ne dépasse pas 2 mm avec un écart-type de 3 mm et une variabilité interindividuelle de 5 mm. Par conséquent, une variable moins sujette à la variation d'un essai à l'autre a été utilisée (c'est-à-dire, T_z). Aucun effet significatif de la PP sur la production d'un moment vertical avant t_0 n'a été observé [$F_{(3,36)}=1.9$, $p > .10$]. De même, le début du moment vertical par rapport à t_0 (*Début*), l'amplitude maximal (*M*) et minimal (*m*), ainsi que la durée de la phase positive (*ΔPos*) et négative (*ΔNeg*) et leur intégration respective (*∫Pos* et *∫Neg*) ne présente aucune variation en fonction de la PP. Cependant, l'analyse du temps séparant t_0 du pic maximal (*tM*) et du pic minimal (*tm*) montre un effet significatif de la PP ([$F_{(3,36)}=4.3$, $p < .01$] et [$F_{(3,36)}=3.3$, $p < .05$], respectivement). Le moment d'apparition du pic maximal et minimal semble retardé dans le temps en condition PP₇₀₀.

	PP 300	PP 500	PP 700	PP 900
<i>Début (ms)</i>	25.7 ± 22.6	25.7 ± 24.8	28.1 ± 21.2	25.9 ± 17.5
<i>M (N.mm)</i>	9878.8 ± 2169.5	9466 ± 1919.3	9746.8 ± 2162.5	9672.9 ± 2269.8
<i>m (N.mm)</i>	7209.7 ± 1580	6728.1 ± 1200.1	6942 ± 1250.3	7131.8 ± 1293.2
<i>tM (ms)</i>	167.8 ± 23.5	171.2 ± 24.6	177.5 ± 22.5 *	170.5 ± 20.9
<i>tm (ms)</i>	394.8 ± 27.8	401 ± 25.4	410 ± 26.9 *	402.6 ± 28.3
<i>ΔPos (ms)</i>	277.5 ± 23.9	280.1 ± 25.1	287.1 ± 24.2	282.5 ± 23.4
<i>ΔNeg (ms)</i>	295.6 ± 47.3	290.8 ± 44.4	306.5 ± 41.6	292.5 ± 46.7
<i>∫Pos (N.mm.s)</i>	1408.8 ± 296.1	1352.3 ± 290.2	1421.8 ± 311.1	1402.9 ± 333.5
<i>∫Neg (N.mm.s)</i>	1273.3 ± 323.1	1173.9 ± 307	1263.9 ± 284.3	1269.9 ± 347.7

Tableau IV-1 : Récapitulatifs des valeurs calculés sur le moment vertical en fonction de la PP.

Nous observons uniquement une augmentation du temps pour atteindre le pic maximal et minimal du moment vertical lors de la PP₇₀₀. Le niveau de significativité a été indiqué par un astérisque (*). $p < .05$

L'intensité du moment vertical n'est pas modifiée en fonction de la PP, seul un retard temporel des pics maximaux et minimaux est constaté durant l'optimum de préparation neutre (PP₇₀₀).

4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était de montrer 1) l'existence d'une complexité ou contrainte posturale plus importante dans la condition *Debout* par rapport à la condition *Assis*, 2) la dépendance de l'optimum de préparation neutre envers cette complexité ou contrainte posturale et 3) la persistance de la relation posture/mouvement observée lors d'une préparation spécifique pour une préparation spécifique.

4.1. Complexité liée à la posture *Assis* vs. *Debout*

L'élévation unilatérale d'un bras à l'horizontale s'accompagne par des forces latérales importantes et d'un moment autour de l'axe vertical dû à des contractions musculaires asymétriques (Shiratory et Latash, 2000). Dans la présente expérimentation, le mouvement d'élévation d'un bras s'accompagnait par un recrutement simultané des Erector Spinae ipsilatéral et controlatéral au mouvement dans les deux conditions posturales. Le rôle de ces muscles proximaux consisterait à minimiser de la perturbation antéro-postérieure avec peu, voir pas, d'effet sur la minimisation de la perturbation latérale et rotationnelle qu'engendre l'élévation d'un bras. Cependant, les muscles posturaux distaux, controlatéral et ipsilatéral au mouvement (TFL et BF) montrent une stratégie posturale différente en fonction de la condition posturale. L'ordre d'activation du BFi et BFc n'est pas modifié en fonction de la condition posturale, cependant, l'activation du BFc intervient plus tôt après l'initiation du mouvement en condition debout. Enfin, le TFL présente un recrutement inversé en fonction de la condition posturale, le TFLi précède le TFLc en condition *Assis* alors que le TFLc précède le TFLi en condition *Debout*. Le recrutement asynchrone de ces muscles distaux jouerait donc un rôle dans la production du moment vertical. Cependant, ce moment vertical ne peut pas être comparé entre les deux conditions posturales puisque la base de sustentation est plus importante dans la condition *Assis*. Cela a pour effet d'augmenter la distance entre le CG et le point d'application de la force (c'est-à-dire, le bras de levier), créant ainsi un moment vertical supérieur. Néanmoins, ce moment produit dans les deux conditions

posturales présentes deux phases successives similaires : une phase positive dans le sens horaire qui est suivie par une phase négative dans le sens anti-horaire (Bleuse et al., 2002). Le recrutement inversé des deux TFL en fonction de la condition posturale peut donc jouer un rôle dans la minimisation du moment vertical développé (Bouisset et Zattara, 1987 ; Shiratory et Latash, 2000). En d'autres termes, la planification de la synergie posturale afin de minimiser le moment vertical est modifiée en fonction de la condition posturale.

La condition posturale engendre une autre différence dans la séquence d'activation musculaire. Une synergie disto-proximale a, en effet, été décrite dans la majorité des articles sur la production d'APAs en condition *Debout* qui reflèterait un principe général d'activation (Cordo et Nashner, 1982 ; Horack et al., 1984 ; Bouisset et Zattara, 1987). Alors que, Van der Fits et al. (1998) observent une autre séquence d'activation inverse en condition *Assis* sans dossier (synergie proximo-distale). Par ailleurs, Teyssède et al. (2000) observent une séquence d'activation démarrant par l'inhibition de l'extenseur ipsilatéral du dos suivie par une activation des muscles au niveau du pelvis et de la cuisse. Cette séquence a été observée lors d'une tâche de pointage en condition *Assis*, la cible au niveau de l'épaule. Nos résultats montrent une séquence d'activation similaire avec une activation quasi simultanée des extenseurs du dos et du TFL ipsilatéral suivie par l'activation du BF ipsilatéral et confirme une modification de la synergie disto-proximale en condition *Debout* au profit d'une synergie proximo-distale en condition *Assis*. Ainsi, la séquence d'activation des muscles posturaux est dépendante de la configuration posturale (Le Bozec et al., 2001). La commande Feedforward pourrait ainsi adapter le programme moteur général en fonction des contraintes posturales (Aruin et Latash, 1995).

Enfin, les résultats montrent une plus grande instabilité posturale dans la condition *Debout* par rapport à la condition *Assis* au regard du temps passé à l'intérieur des anneaux concentriques. De plus, Le contrôle postural semble plus important dans la condition *Debout* avec une augmentation de la latence et de l'intensité des APAs. Ainsi, le contrôle postural anticipé serait plus important dans la condition *Debout* où l'instabilité posturale induite par le mouvement est plus grande.

4.2. Optimum de préparation et nature de la préparation

Le chapitre précédent montre une PP optimale plus importante dans la condition *Debout* par rapport à la condition *Assis* (700 ms vs. 500 ms) **lors d'une préparation sélective** (Cuisinier et al., 2005). Cette étude montre que la **préparation neutre** ne modifie pas ce

résultat. L'optimum de préparation neutre augmente à 700 ms dans la condition *Debout* par rapport à la condition *Assis* (500 ms). Ce résultat suggère que l'augmentation de la PP optimale n'est pas dépendante de l'information sur le côté du mouvement focal à exécuter (bras droit ou gauche). De plus, le niveau de préparation optimal (c'est-à-dire le temps prémoteur le plus court) n'est pas maintenu pour les durées de PP 700 ms en condition *Assis* et 900 ms en condition *Debout*, ce qui suggère que la préparation motrice est un processus passif (Posner et Boies, 1971), c'est-à-dire, une incapacité du sujet à prédire le moment d'apparition du SI malgré une présentation bloquée de la durée de la PP (Hasbroucq et al. 1997). Ces deux résultats supposent donc que l'augmentation de l'optimum de préparation dans la condition *Debout* est indépendante des informations préalablement fournies au sujet sur le mouvement focal à réaliser. La première expérimentation supposait une augmentation de la PP optimale due à une prise en compte des APAs dans la préparation motrice. La similitude des résultats lors de l'utilisation d'une préparation neutre ne permet pas de valider cette hypothèse. En effet, l'absence d'information préalable au mouvement ne permet pas de préparer correctement le mouvement et donc les APAs puisque la synergie posturale dépend de la latéralité (Teysseire et al., 2000).

Il est intéressant de montrer que l'optimum de préparation dans la condition *Assis* n'est pas différent lorsque le sujet doit appuyer sur un bouton (Bertelson, 1967 ; Bertelson et Tisseyre, 1968 ; Posner et Boies, 1971) par rapport à un mouvement d'élévation d'un bras. Même si ce dernier engendre de faibles APAs en condition *Assis* (synchronisé par rapport à l'initiation du mouvement), la stabilité posturale est plus importante qu'en condition *Debout*, condition où les APAs sont plus détaillés dans le temps avec une intensité plus importante. Par conséquent, il semblerait que l'augmentation de la PP optimale soit due à une augmentation de la complexité posturale de la tâche et non d'un effet spécifique de la planification des APAs en vue de minimiser la perturbation posturale induite par le mouvement.

Cependant nous pouvons supposer un effet de la préparation neutre sur le temps prémoteur lors de la PP₇₀₀. Le temps prémoteur le plus court était de 175 ms lors d'une préparation sélective (cf. chapitre précédent) alors qu'il est de 195 ms lors d'une préparation neutre. Bien entendu, cette observation reste à confirmer lors d'une analyse comparant les deux types de préparation avec les mêmes sujets en condition *Debout*. Cependant, les travaux de Lépine et al. (1989) ainsi que de Olivier et Rival (2002) montrent une diminution du TR d'une préparation neutre à une préparation sélective représentant ainsi un gain de temps du à

une préprogrammation des paramètres du mouvement pendant la PP. Noter que le mouvement demandé lors de ces deux études était une tâche de presse-bouton lorsque les sujets étaient confortablement assis. Ainsi, ce gain de 20 ms observé entre les deux types de préparation dans la condition *Debout* peut provenir d'une préprogrammation des APAs et/ou du mouvement focal si et seulement si une augmentation des APAs est associée à une diminution du temps prémoteur entre les deux type de préparation (neutre vs.sélective).

4.3. Stratégie posturale debout en fonction de la nature de la préparation

Aucun déplacement anticipé du CP (ΔCP_y et ΔCP_x) n'est observé quel que soit la durée de la PP. Cet absence de déplacement antéro-postérieur du CP avant t_0 diffère des résultats obtenus lors d'une préparation sélective (Cuisinier et al., 2005). Ce résultat suggère qu'une préparation sélective permet d'utiliser l'information préalable permettant de créer des APAs plus importants (Woollacott et al., 1984). Les études comparatives analysant les APAs dans des modes de déclenchement du mouvement différents (TRS vs. TRC) montrent des APAs plus faibles dans la condition TRS par rapport à la condition TRC (Benvenuti et al., 1997 ; Slijper et al., 2002). Ainsi, les APAs seraient réduits lorsque la prédiction du mouvement est importante. Nos résultats corroborent ce phénomène et montrent que lors de l'optimum de préparation (PP_{700}), la latence des APAs est la plus faible. Par conséquent, il semble qu'une priorité d'action s'établisse entre la commande focale et posturale. Lorsque le temps prémoteur est le plus court (PP_{700}), nous observons un retard de la synergie posturale anticipée conduisant à un retard dans l'apparition du pic maximal et du pic minimal du moment vertical T_z . Ce résultat n'est pas différent d'une préparation sélective (Cuisinier et al., 2005). Par conséquent, la coordination entre la commande focale et posturale est similaire quel que soit la nature de la préparation, la priorité est donnée à l'initiation du mouvement focal par rapport à l'initiation de la commande posturale. En ce sens, les sujets pourraient gagner du temps en préparant des APAs moins anticipés afin de réagir le plus vite possible comme le suggère les régressions linéaires (le temps prémoteur étant dépendant de nombreuses variables, il n'est pas étonnant de constater des coefficients de corrélation relativement faibles mais néanmoins significatifs). Les sujets pourraient préparer des APAs en fonction du temps accordé par le temps prémoteur (Brown et Franck, 1987).

En conclusion, la nature de la préparation ne modifie pas la coordination entre la posture et le mouvement. Deux mécanismes sont observés : un temps plus important pour planifier la commande posturale à cause d'une complexité accrue en condition *Debout*. Cette

augmentation de la PP optimale a pour origine l'exécution d'un mouvement sur une posture plus instable et ne dépend pas uniquement d'une intégration de la planification des APAs durant la PP. Le deuxième mécanisme correspond au retard de la commande posturale par rapport à la commande focale lorsque le temps prémoteur est le plus court. Ce mécanisme n'est pas modifié en fonction de la nature de la préparation. Ce résultat renforce l'idée d'une modulation temporelle dans l'organisation centrale des commandes posturale et focale en fonction du temps de préparation. La commande posturale semble retardée afin de réagir le plus vite possible.

CHAPITRE V: EFFET D'UNE INFORMATION PRÉALABLE SUR LA PRÉPARATION POSTURALE

1. INTRODUCTION

Il ne fait plus de doute à la suite de ces premiers chapitres que des APAs évoluent en fonction de la durée de la PP lors d'un mouvement d'élévation d'un bras. Ces APAs semblent réduits lors de la durée de la PP optimale, c'est-à-dire pour le temps prémoteur le plus court. Cet optimum de préparation serait dépendant de la condition posturale quel que soit le type de préparation (neutre vs. sélective) suggérant ainsi un effet de la complexité globale de la posture et non un effet spécifique de la préprogrammation des APAs durant la PP. Par ailleurs, les résultats de ces deux chapitres sur le temps prémoteur suggèreraient un temps prémoteur plus important lors de la préparation neutre par rapport à la préparation sélective. Au niveau des variables issues du contrôle postural, nous observons un déplacement antéro-postérieur anticipé du CP en préparation sélective, déplacement étant absent lors d'une préparation neutre. Bien que la coordination entre la posture et le mouvement en fonction de la durée de la PP semble similaire, il existerait des différences entre les deux types de préparation tant au niveau du contrôle moteur que du contrôle postural. Sur le plan moteur, ces différences ont été mises en évidence par les travaux de Georgopoulos (1981) ainsi que Rosenbaum et Kornblum (1982). Dans une tâche de TRC, une information présentée pendant le signal préparatoire est connue pour diminuer le temps de traitement de la réponse associée. Dans le domaine postural, certaines pistes laissent à penser que la méthode de precuing permet un ajustement de la commande posturale. Lors d'une perturbation posturale produite par une translation antéro-postérieure de la plate-forme de force, le temps de latence entre le début de l'activité électromyographique du gastrocnemius et du tibialis anterior se réduirait (McChesney et al., 1996).

L'utilisation d'un protocole basé sur un mouvement de délestage est intéressant dans la mesure où 1) l'information qui est présentée renseigne directement sur la perturbation posturale à venir, et 2) nous pouvons nous affranchir des problèmes associés aux effets de la vitesse du mouvement, tant sur la variable temps prémoteur (Sanders, 1990) que sur les APAs (Horack et al., 1984 ; Dick et al., 1986 ; Lee et al., 1987 ; Bouisset et Zattara, 1990 ; Aruin et Latash, 1995a ; Mochizuki et al., 2004). Ainsi, nous sommes plus à même de montrer une optimisation de la commande posturale relative à une information la concernant et présentée

pendant la durée de la PP. Cela tendrait à montrer une préprogrammation des APAs durant la PP, indépendante du TR et illustrant un mode de contrôle en parallèle (cf. Figure II-5, page 51).

Nous avons utilisé une méthodologie basée sur une durée de la PP constante d'un essai à un autre dans les deux premières études. Ce type de présentation est connu pour engendrer une stratégie d'estimation du moment d'apparition du SI caractérisée par une augmentation du TR en fonction de la PP. Ce résultat est classiquement interprété comme une incapacité à estimer correctement l'écoulement du temps à mesure que la PP s'allonge. Cette présente étude relève quant à elle d'un mode de présentation aléatoire connue pour modifier la relation PP-TR. Cette présentation produirait en effet une diminution du TR à mesure que la durée de la PP s'allonge (Woodrow, 1914 ; Bertelson et Tisseyre, 1968 ; Bertelson et Tisseyre, 1969 ; Niemi et Näätänen, 1981 ; Mattes et Ulrich, 1997 ; Van der Lubbe et al., 2004). La prédiction du moment d'apparition du SI n'étant pas disponible, il se peut que la production des APAs en soit modifiée.

Cette étude comporte donc plusieurs objectifs. Dans un premier temps, elle vise à comparer la coordination posture/mouvement en fonction de la nature de la préparation (neutre vs. sélective). Pour répondre à cette interrogation, nous avons étudié le TR ainsi que la perturbation posturale induite par le délestage d'un poids lors d'une préparation sélective et une préparation neutre. Nous supposons que les commandes focale et posturale sont toutes les deux capables d'utiliser une information sur la perturbation posturale durant la PP afin respectivement 1) de réagir plus vite, et 2) d'augmenter la stabilité posturale. Si cette hypothèse s'avère exacte, cela tendrait à montrer une utilisation active de la PP afin de préparer la réponse motrice et les APAs qui lui sont associés. Dans un deuxième temps, nous avons cherché si il existait une modification de la relation APAs-TR lors de la présentation aléatoire de la durée de la PP. Afin de répondre à cette question, nous avons analysé la quantité d'APAs produite lors du délestage du poids en préparation *Neutre* et *Sélective* en fonction de la durée de la PP. Nous supposons que cette relation n'est pas modifiée soulignant ainsi une caractéristique intrinsèque de la coordination entre la posture et le mouvement. La commande posturale anticipée serait moins importante afin de répondre le plus rapidement possible.

2. METHODE

2.1. Sujets

Huit sujets masculins droitiers, sans antécédent moteur ou neurologique (âge moyen 24.8 ± 2.8 ans de poids 64.3 ± 7 Kg et de taille 176 ± 5 cm) ont participé à l'expérimentation.

2.2. Matériel

Les sujets étaient placés sur une plate-forme de force, les bras tendus à l'horizontale faisant un angle de 90° par rapport au tronc. Les signaux de la plate-forme de force ont permis d'enregistrer les forces suivant l'axe antéro-postérieur (F_y), latéral (F_x), et vertical (F_z) ainsi que les trois moments dans les trois plans de l'espace : saggital (M_x), frontal (M_y) et vertical (M_z).

Les sujets tenaient dans les mains une pièce de bois sur laquelle était fixée un accéléromètre (ENTRAN) et un bouton actionné par l'index de la main droite (cf. figure V-1). Relâcher ce bouton entraînait le délestage d'un poids de 5 Kg qui était initialement maintenu par un électro-aimant placé sous la pièce de bois. Un autre bouton était mis à la disposition de l'expérimentateur ce qui lui permettait de contrôler l'action du délestage (autorise ou non le délestage initié par le sujet). Ainsi, le délestage était initié par le sujet ou l'expérimentateur suivant les conditions expérimentales. Le poids était rattrapé le cas échéant par un deuxième expérimentateur.

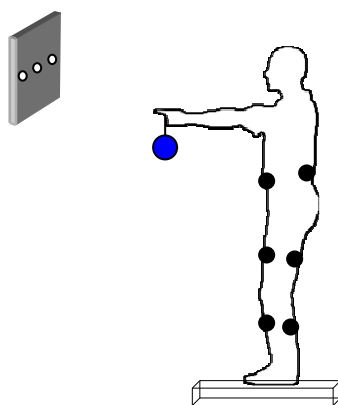


Figure V-1: Illustration du matériel utilisé.

Le sujet était placé sur une plate-forme de force, la tâche consistait à délester un poids de 5 Kg à partir de l'horizontale (en bleu). Le système de délestage était contrôlé soit par le sujet soit par l'expérimentateur grâce à l'utilisation de deux boutons, l'un placé sur la pièce de bois tenue par le sujet, l'autre devant l'expérimentateur en dehors du champ visuel du sujet. La manipulation de l'un des deux boutons engendrait le délestage du poids induisant une perturbation posturale. L'activité électromyographique de six muscles posturaux a été enregistrées : ES et RA, BF et RF ainsi que SOL et TA (cercles noirs).

Des électrodes bipolaires ont été utilisées afin d'enregistrer l'activité électromyographique du côté gauche du corps : *Erector Spinae* (ES), *Rectus Abdominis* (RA), *Biceps Femoris* (BF), *Rectus Femoris* (RF), *Soleus* (SOL) et le *Tibialis Anterior* (TA). Ces électrodes bipolaires de surface ont été positionnées à 3 cm l'une de l'autre et le signal recueilli a été filtré avec une bande passante de 50-400 Hz.

La cible visuelle composée des trois LEDs bicolores espacées de 18 cm suivant l'axe horizontal a été réutilisée et placée à 150 cm du sujet à hauteur des yeux.

Tous les signaux ont été enregistrés à une fréquence de 1000 Hz avec une résolution de 12 bits/s. Le système Datac a permis de contrôler l'expérimentation et de synchroniser les signaux issus des différents capteurs.

2.3. Procédure et conditions expérimentales

Les instructions données au sujet étaient de relâcher le bouton avec l'index droit le plus rapidement possible après l'apparition des signaux visuels et de conserver une stabilité des bras et du corps entier jusqu'à l'apparition du signal auditif « OK ». Une fois la posture initiale stabilisée, les yeux fixés sur la LED centrale, l'index droit pressé sur le bouton, les sujets devaient initier le délestage à la suite de deux signaux lumineux consécutifs (100 ms) : un signal préparatoire, SP et un signal impératif SI. *Le temps séparant le SI du SP était aléatoire*, 200, 400, 600 et 800 ms, constituant une PP de 300, 500, 700 et 900 ms avec la durée du SP.

Deux blocs d'essais étaient présentés au sujet en fonction de la nature du SP. A l'intérieur du premier bloc (56 essais), aucune information n'était donnée au sujet concernant le *Délestage* ou le *Non Délestage*, le SP était représenté par l'allumage des trois LEDS. L'information sur la perturbation posturale était donnée par le SI « *préparation neutre* ». Durant cette préparation, deux cas pouvaient se présenter. Premier cas, les sujets étaient informés du délestage à la suite de l'allumage des deux LEDS excentriques durant le SI (20 essais). Dans le deuxième cas, l'information sur le Non Délestage était représentée par l'allumage de la LED centrale durant le SI (20 essais). Durant ces deux conditions, une équiprobabilité de la durée de la PP était présentée (5 essais par PP). Enfin, durant ce bloc d'essais, une condition « *aucune préparation* » était représentée par un SI identique au SP (les trois LEDS allumées), ainsi le sujet n'avait aucune information sur les conséquences de

son action focale (16 essais comprenant 8 délestages et 8 non délestages) (cf. Figure gauche V-2, page 99).

Durant le second bloc, une information préalable sur la perturbation posturale était donnée au sujet durant le SP. Lorsque les deux LEDS excentriques étaient allumées, le sujet était informé du délestage consécutif au relâchement du bouton (20 essais). Lorsque la LED centrale s'allumait, le sujet était informé qu'aucun délestage n'allait apparaître lors du relâchement du bouton (20 essais). Ce signal était confirmé par le SI (identique au SP), « *préparation sélective* ». Durant quelques essais (20 %), aucun SI n'était présenté afin d'éviter toute anticipation de la réponse (cf. Figure de droite V-2).

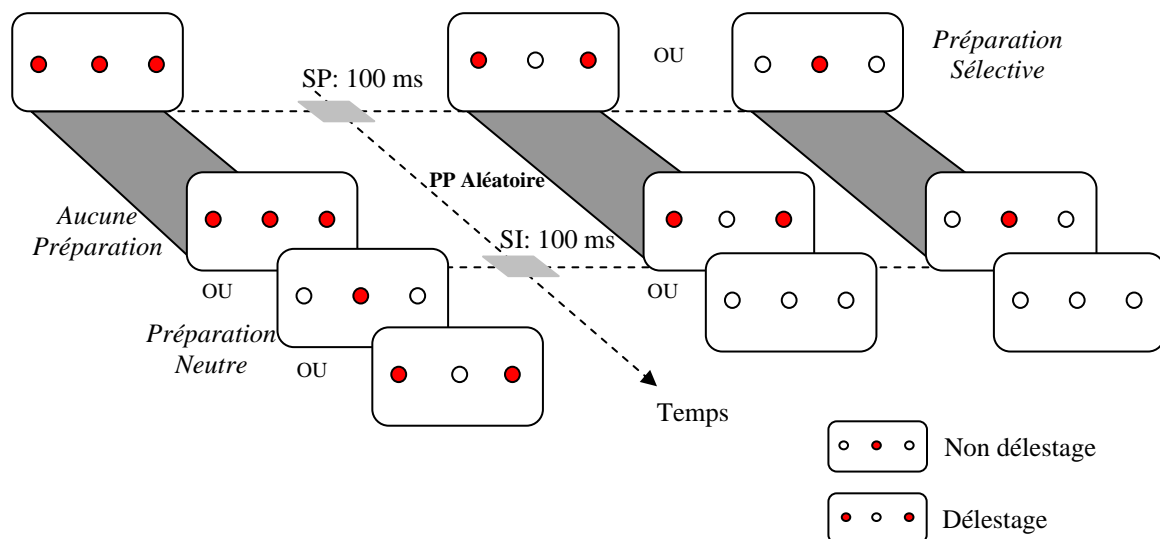


Figure V-2 : Illustration de la procédure expérimentale.

Un SP de 100 ms était suivi d'une PP variable. Le SI dépendait de la condition. En condition de *préparation neutre*, le SP ne donnait aucune information sur l'occurrence ou non du délestage lorsque le sujet relâcherait le bouton. Dans certains cas, le SI était identique au SP, ainsi, aucune information n'était donnée au sujet sur les conséquences de l'action focale (*aucune préparation*). Alors que dans les autres cas, le SI présentait une information sur l'occurrence de la perturbation posturale (LEDs excentriques = Délestage ; LED centrale = Non Délestage). En condition de *préparation sélective*, l'occurrence de la perturbation posturale était présentée durant le SP. Cette information était confirmée par le SI. Afin d'éviter une anticipation de la réponse, des essais « à blanc » étaient présentés dans cette condition (aucun SI). Le sujet ne devait donc pas répondre.

Trois facteurs ont été manipulés : la perturbation posturale (*Délestage* vs. *Non Délestage*), la nature de la préparation (*Aucune*, *Neutre* et *Sélective*) ainsi que la durée de la PP présentée aléatoirement (PP_{300} , PP_{500} , PP_{700} et PP_{900}).

Afin d'éviter toutes sensations de fatigue, le sujet effectuait une pose de 5 min tous les dix essais, l'intervalle de temps entre les deux blocs d'essais était de 15 min. Aucun sujet n'a présenté de signes de fatigue.

2.4. Analyses des Données

Les données ont été analysées grâce au logiciel Matlab. Les signaux EMG ont été rectifiés et filtrés avec un filtre passe-bas Butterworth de 100 Hz et d'ordre 2. Les données issues de la plate-forme de force et de l'accéléromètre ont été filtrées avec un filtre identique de fréquence de coupure 10 Hz.

2.4.1. Analyse du mouvement

Les essais ont été synchronisés par rapport au moment de l'action de l'index du sujet sur le bouton (t_0). Ce temps a permis de mesurer le TR du sujet. Les essais avec un TR inférieur à 120 ms et supérieur à 500 ms ont été écartés de l'étude (moins de trois essais par condition).

Le délestage du poids entraînait un mouvement d'élévation du bras. Pour quantifier la perturbation posturale au niveau des bras, nous avons mesuré le pic maximal d'accélération (Acc).

2.4.2. Analyse électromyographique

Afin de quantifier l'activité EMG, le signal a été intégré sur une fenêtre de -150 à t_0 ($\int EMG_{total}$). L'activité basale du muscle considéré a été intégrée sur une fenêtre de -300 à -150 ms par rapport à t_0 ($\int EMG_{b(150)}$). Afin de minimiser la variabilité interindividuelle, l'activité EMG du muscle considéré a été ramenée à un pourcentage de son activité basale grâce au calcul suivant :

$$\int EMG_{myo} = \int EMG_{total} / \int EMG_{b(150)} \cdot 100 \quad \text{Équation 5}$$

Ainsi, une inhibition de l'activité posturale est observée lorsque $\int EMG < 100$. Lorsque cette valeur avoisine 100, aucune modification de l'activité musculaire par rapport à l'activité

basale n'est observée. Enfin si l'indice est supérieur à 100, on observe une activation du muscle plus importante.

2.4.3. Analyse du déplacement du CP

Le déplacement antéro-postérieur du CP a été calculé suivant l'équation 2 (page 37). Trois déplacements du CP ont été calculés par rapport à la valeur de base (moyenne sur une fenêtre de -300 à -200 ms par rapport à t_0) : 1) jusqu'au premier pic vers l'arrière observé dans les 100 ms après t_0 (ΔCP_{pic}), 2) jusqu'au déplacement maximal vers l'avant (ΔCP_{avant}) et jusqu'au déplacement maximal arrière ($\Delta CP_{arrière}$). De plus, le déplacement entre ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} a été calculé ($\Delta CP_{pic \text{ à } pic}$) afin de vérifier le lien direct entre ces deux valeurs.

2.5. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été faites sur les moyennes des valeurs mesurées dans chaque condition. La première partie des résultats est basée sur une analyse de variance ANOVA à deux facteurs 2 Perturbations posturales : (*Délestage* et *Non Délestage*) \times 3 Niveaux de préparation (*Aucune*, *Neutre* et *Sélective*). La deuxième partie est basée sur une analyse de variance à deux facteurs 2 Niveaux de préparation (*Neutre* et *Sélective*) \times 4 Durées de la PP (*PP₃₀₀*, *PP₅₀₀*, *PP₇₀₀* et *PP₉₀₀*) lors du délestage. Les relations entre les différentes variables dépendantes ont été mises en évidence par des régressions linéaires. Enfin, le test post-hoc de Tuckey a été utilisé lorsque cela s'avérait nécessaire. Le niveau de significativité était atteint pour une valeur $p < .05$.

3. RESULTATS

3.1. Effets de la perturbation posturale et de la condition de préparation

3.1.1. Centre des pressions et accélération du bras

La figure V-3 (page 102) représente le déplacement antéro-postérieur du CP en fonction de la perturbation posturale et du niveau de préparation. L'analyse de variance ANOVA 2 perturbations posturales (*Délestage* et *Non délestage*) \times 3 Niveaux de préparation (*Aucune*, *Neutre* et *Sélective*) sur le déplacement maximal vers l'avant (ΔCP_{avant}) montre un effet d'interaction significatif [$F_{(2,14)}=4.4$, $p < .05$]. Lorsque aucune perturbation posturale n'est

créée, ΔCP_{avant} n'est pas différent entre les trois niveaux de préparation (4.8 ± 2 mm ; 4.8 ± 1.5 mm ; 4.4 ± 1.1 mm, respectivement). Cependant, lorsque le délestage est créé, ΔCP_{avant} diminue des conditions *Aucune préparation* et *Préparation neutre* à la condition *Préparation sélective* (5.2 ± 3.2 ; 4 ± 2.6 ; 2.7 ± 2.2 mm, respectivement). Ainsi, lors de la condition de *Préparation sélective*, le déplacement maximal du CP vers l'avant diminue par rapport à toutes les autres conditions ($p < .05$).

De plus, l'ANOVA basée sur le déplacement maximal arrière du CP ($\Delta CP_{arrière}$) montre un effet significatif de la perturbation posturale [$F_{(1,7)}=327.5$, $p < .001$] et du niveau de préparation [$F_{(2,14)}=14.1$, $p < .05$]. Le déplacement maximal arrière augmente de 3 mm à 18 mm lorsque le délestage apparaît. Ce déplacement diminue de la condition *Aucune préparation* à la condition de *Préparation sélective* (19.4 ± 2.7 mm vs 17.7 ± 2.1 mm, respectivement).

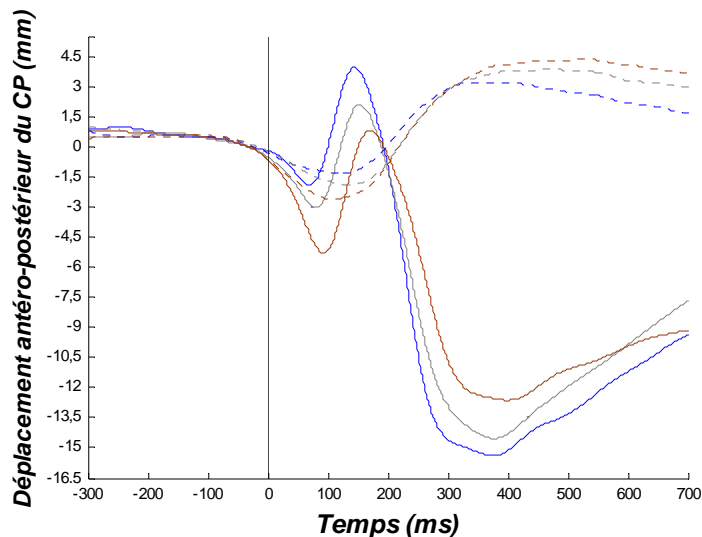


Figure V-3 : Déplacement du CP en fonction de la présence du délestage et de la nature de la préparation.

Lors du délestage (*trait plein*), on peut observer un premier déplacement vers l'arrière (ΔCP_{pic}) suivi d'un pic vers l'avant (ΔCP_{avant}) et enfin d'un déplacement vers l'arrière ($\Delta CP_{arrière}$). ΔCP_{pic} est plus important lors de la préparation sélective (*rouge*) avec un ΔCP_{avant} et $\Delta CP_{arrière}$ moins important par rapport à la condition aucune préparation (*bleu*) et préparation neutre (*gris*). Noter la persistance d'un déplacement du CP lorsque aucune perturbation posturale n'est créée (*pointillé*).

Ces deux résultats montrent une stabilité posturale plus importante dans la condition de préparation sélective lorsque le délestage est présent. Cependant, on observe une modification du déplacement du CP même lorsque le poids ne va pas tomber suggérant une préparation posturale qui reste présente dans cette condition.

Une ANOVA identique a été réalisée sur le pic du déplacement du CP vers l'arrière qui apparaît dans les premières 100 ms après l'initiation du délestage (ΔCP_{pic}) afin de voir les effets des APAs sur le déplacement du CP. Cette analyse révèle un effet d'interaction entre la perturbation posturale et le niveau de préparation [$F_{(2,14)}=8.8, p<.005$]. Le ΔCP_{pic} ne varie pas en fonction du niveau de préparation lorsque aucun délestage n'est effectué. Cependant, lorsque la perturbation posturale est créée, ce déplacement est moins important dans la condition *Aucune préparation* par rapport à la condition de *Préparation sélective* (de $-2.8 \pm .7$ mm à $-3.6 \pm .7$ mm, respectivement, $p < .05$).

L'effet des APAs consécutif au délestage est donc plus important lors d'une préparation sélective.

Des régressions linéaires ont été effectuées entre les variables ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} lors de la présence du délestage. Les résultats sont présentés dans le tableau V-1, page 105. Quel que soit le niveau de préparation on observe une corrélation entre ces deux variables ($.47 < R < .56, ps < .001$). Plus le déplacement du premier pic vers l'arrière est important (ΔCP_{pic}), moins le déplacement maximal vers l'avant est important (ΔCP_{avant}).

Afin d'apporter plus de poids aux corrélations observées, le déplacement entre ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} (ΔCP_{pic} à pic) a été analysé grâce à une ANOVA à deux facteurs 2 perturbations posturales (*Délestage* et *Non Délestage*) \times 3 niveaux de préparation (*Aucune*, *Neutre* et *Sélective*). Les résultats montrent un effet simple du niveau de préparation [$F_{(2,14)}=4.8, p<.05$]. Le déplacement ΔCP_{pic} à pic est moins important lors de la *Préparation sélective* par rapport à la condition *Aucune préparation* (6.5 ± 1.7 mm vs. 7.8 ± 3 mm, respectivement, $p < .05$). La corrélation observée entre le ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} lors du délestage montre clairement une dépendance entre déplacement vers l'arrière et le déplacement maximal vers l'avant. Plus le ΔCP_{pic} est important, plus ΔCP_{avant} est faible et ce quel que soit le niveau de la préparation.

Afin d'analyser la perturbation posturale au niveau des bras, une ANOVA a été réalisée sur l'amplitude maximale de l'accélération des bras (*Acc*). Nous avons observé une interaction significative entre la condition de perturbation posturale et la condition de préparation [$F_{(2,14)}=5.39; p < .05$]. L'analyse post-hoc a montré un effet significatif de la condition de perturbation posturale (cf. Figure V-4, page 104). L'accélération des bras dirigée

vers le haut diminue de la condition *Aucune préparation* à la condition *Préparation sélective* (25.6 ± 3 vs. 23.5 ± 3.1 m/s², respectivement). Lorsque aucune perturbation posturale n'apparaît, l'accélération des bras est dirigé vers le bas et n'évolue pas en fonction de la condition de préparation (environ $2 \pm .5$ m/s²).

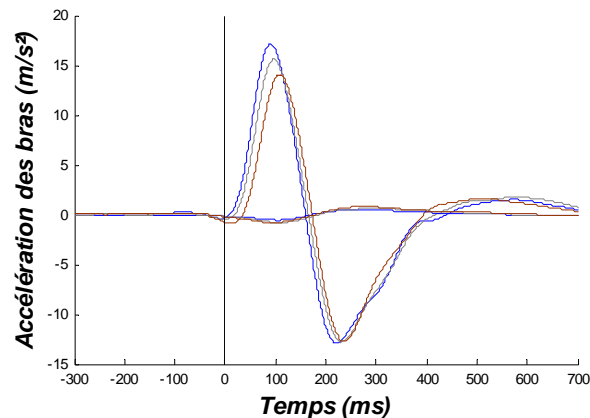


Figure V-4 : Accélération du bras en fonction de la présence du délestage et de la nature de la préparation chez un sujet représentatif.

Les régressions linéaires entre l'accélération des bras (Acc) et les deux variables issues du déplacement du CP (ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant}) montrent une corrélation plus importante dans la condition de *Non délestage*. Ainsi, le déplacement du CP peut être davantage expliqué par l'accélération des bras dans la condition de *Non délestage* quel que soit le niveau de la préparation (cf. Tableau V-1, page 105). La faible corrélation entre l'accélération des bras et ΔCP_{pic} lors du délestage laisse à penser que la diminution de l'accélération des bras dans la condition de *Préparation sélective* est indépendante de l'effet de l'augmentation des APAs observée dans cette condition. Elle est davantage corrélée avec le déplacement maximal du CP vers l'avant.

Ces résultats suggèrent une perturbation posturale des bras moins importante dans la condition de Préparation sélective avec délestage du poids. De plus, cette perturbation posturale au niveau des bras semble indépendante de celle observée au niveau du déplacement du CP.

	<i>Délestage</i>			<i>Non Délestage</i>		
	Aucune Préparation	Préparation Neutre	Préparation Sélective	Aucune Préparation	Préparation Neutre	Préparation Sélective
Acc vs CoP_{avant}	.26*	.35†	.48†	.49†	.59†	.55†
Acc vs CoP_{pic}	.19	.36†	.27†	-.62**	-.73†	-.63†
Acc vs ∫EMG_{ES}	.001	.09	.15*	-.36**	-.53†	-.36†
Acc vs ∫EMG_{BF}	.30*	.07	-.02	-.16	-.44†	-.30†
CoP_{pic} vs CoP_{avant}	.47†	.50†	.56†	-.42*	-.39†	-.14
∫EMG_{ES} vs CoP_{avant}	.22	.23†	.37†	-.30*	-.35†	-.31†
∫EMG_{BF} vs CoP_{avant}	.28*	.18*	.23**	-10	-.24**	-.29†
∫EMG_{ES} vs CoP_{pic}	.16	.26†	.51†	.37†	.55†	.28†
∫EMG_{BF} vs CoP_{pic}	.47†	.22**	.41†	.17	.37†	.27†

Tableau V-1 : Récapitulatif des Coefficients de corrélation entre les différentes valeurs.

Le niveau de significativité a été indiqué par les signes suivants : (*). $p < .05$; (**). $p < .01$; (†). $p < .001$. Noter une corrélation plus importante entre l'accélération des bras et les variables du déplacement du CP et des intégrations des EMGs en condition de Non Délestage par rapport à la condition de délestage. Ces résultats suggèrent une stabilisation des bras relativement indépendante de la stabilisation du corps entier.

3.1.2. Données électromyographiques

L'activité EMG des muscles posturaux de la face antérieure du corps (RA, RF et TA) ne montre aucune variation dans leur activité durant la fenêtre d'analyse de -150 à t_0 . Une modification d'activité est observée environ 150 ms après t_0 . Par conséquent, l'analyse de l'intégration des muscles posturaux ($\int EMG_{myo}$) sur une fenêtre de -150 ms à t_0 se base sur une ANOVA à trois facteurs répétés 2 perturbations posturales (*Délestage* et *Non délestage*) \times 3 muscles posturaux (*ES*, *BF*, *SOL*) \times 3 niveaux de préparation (*Aucune*, *Neutre* et *Sélective*). Deux effets d'interaction ont été trouvés : une interaction entre la condition de perturbation posturale et les muscles posturaux [$F_{(2,14)}=6.9$, $p<.01$] (cf. Figure V-5) ainsi qu'une interaction entre la perturbation posturale et le niveau de préparation [$F_{(2,14)}=7.2$, $p<.01$] (cf. Figure V-6, page 106).

L'analyse post-hoc basée sur la première interaction indique que, quelle que soit la perturbation posturale, deux muscles posturaux (ES et BF) montrent une inhibition anticipée par rapport à t_0 représentant 82 % de leur activité basale (cf. figure V-5, page 106). Noter que l'activité du SOL ne varie pas lors de cette fenêtre d'étude (environ 95 %), conservant une activité EMG supérieure par rapport aux deux autres muscles ($ps<.001$). De plus, seule l'activité EMG des *Erector Spinae* diminue lors de la condition *Délestage* par rapport à la condition *Non Délestage* (de 86 % à 81 %, $p<.01$).

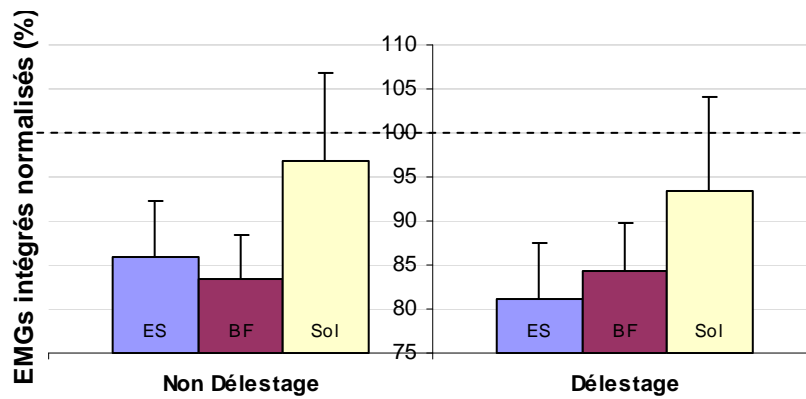


Figure V-5 : Illustration de l'interaction entre la condition de perturbation posturale et les muscles posturaux au niveau des EMGs intégrés normalisés (%).

L'analyse post-hoc de la seconde interaction montre une activité EMG décroissante de la condition de *Non Délestage* par rapport à la condition de *Délestage* lors de la *Préparation sélective* (de 93.5 % à 84 %, $p < .05$). De plus, nous observons une tendance à l'augmentation de l'activité EMG de la condition *Aucune préparation* à la condition de *Préparation sélective* uniquement dans la condition de *Non Délestage* ($p = .06$) (cf. figure V-6).

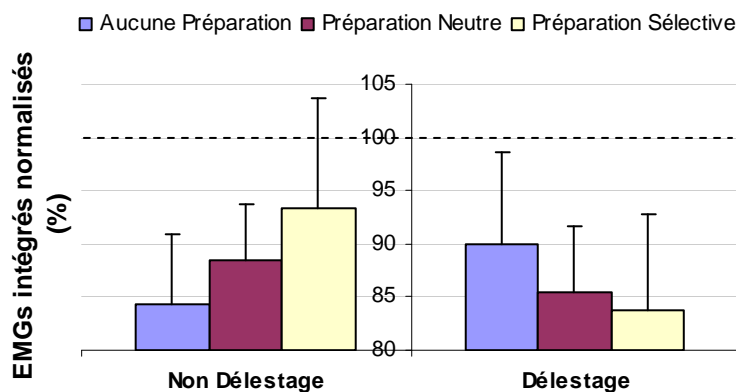


Figure V-6 : Illustration de l'interaction entre la condition de perturbation posturale et le niveau de préparation au niveau des EMGs intégrés normalisés (%).

La ligne en pointillés représente l'activité de base (100 %). Lors de la *Préparation sélective*, l'EMG atteint une valeur de 83% lors du délestage par rapport 92% dans la situation de *Non Délestage*. Ainsi, une inhibition plus importante apparaît durant la fenêtre d'analyse lors du délestage.

Quelle que soit la perturbation posturale, des APAs sont présents au niveau des Biceps Femoris et des Erector Spinae avec une inhibition anticipée plus importante sur ce dernier lors du délestage. De plus, cette inhibition est accrue dans la condition de la Préparation sélective lors du délestage. Au contraire, lors de la condition de Non Délestage, la présence d'une information sur l'absence du délestage semble diminuer ces APAs.

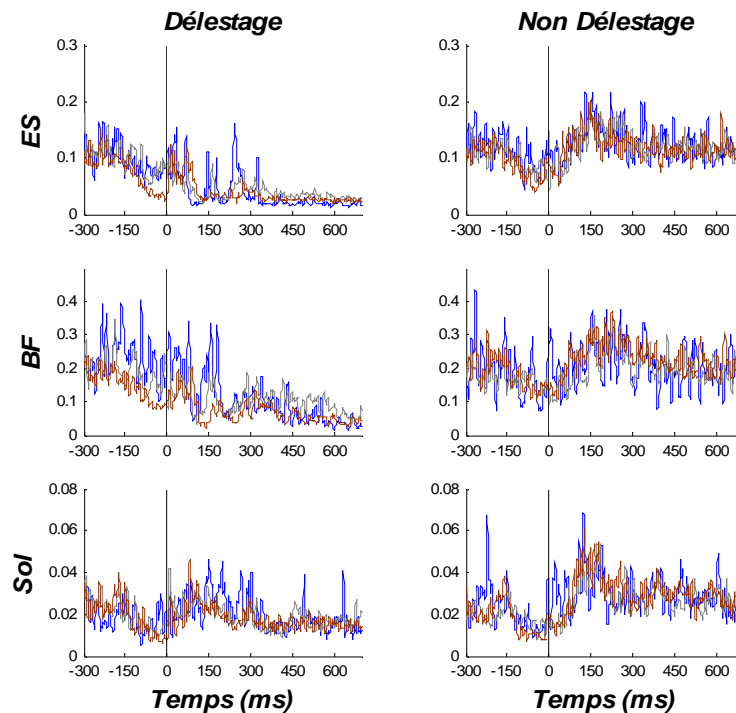


Figure V-7 : Séquence d'inhibition des muscles posturaux en fonction de la perturbation posturale et du niveau de la préparation.

Ce graphique représente une moyenne de tous les essais d'un sujet représentatif. Nous pouvons observer une inhibition plus importante au niveau du muscle ES et du BF dans la condition de *Préparation sélective* (rouge) par rapport à la condition *Aucune préparation* (bleue). La condition de *Préparation neutre* est représentée par la couleur grise. Dans la condition de *Non Délestage* (Figure de droite) nous pouvons observer de très légers APAs quel que soit le niveau de préparation.

Les régressions linéaires basées sur $\int EMG_{ES}$ en fonction du ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} lors du délestage montrent une corrélation significative dans la *Préparation neutre* et *sélective* ($R = .26$ et $.23$ vs. $R = .51$ et $.37$ $ps < .001$, respectivement). Nous observons une inhibition anticipée de l'ES avec un plus grand déplacement du pic arrière (ΔCP_{pic}) et un plus faible déplacement vers l'avant (ΔCP_{avant}). Nous obtenons les mêmes corrélations avec le muscle BF dans les conditions de *Préparation neutre* et *sélective* ($R = .22$ et $.18$ vs. $R = .41$ et $.23$ $ps < .05$, respectivement).

Les régressions linéaires observées dans la condition de préparation neutre et sélective entre l'activation EMG et le déplacement du CP nous montrent une inhibition anticipée des Erector Spinae et des Biceps Femoris corrélé avec une amélioration de la stabilité du corps.

3.1.3. Activité posturale lors du Non Délestage

Une réponse posturale est présente lors du Non Délestage. Le CP se déplace d'abord vers l'arrière puis vers l'avant (Figure V-3, page 102). Associée à ce déplacement du CP, nous observons une variation de l'accélération des bras avec une très légère accélération vers le bas puis vers le haut (cf. figure V-4, page 104). La direction vers le bas de l'accélération des bras nous indique que la réponse posturale a été mise en place afin de minimiser la perturbation posturale *absente dans cette condition*. Cette interprétation est corroborée par la présence de légères inhibitions musculaires dans cette condition quelle que soit la nature de la préparation. Les régressions linéaires basées sur $\int EMG_{ES}$ en fonction de Acc , ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} sont significatives dans toutes les conditions de préparation (*Aucune préparation* : $R = -.36, .37$ et $-.30$, *Préparation neutre* : $R = -.53, .55$ et $-.35$, et *Préparation sélective* : $R = -.36, .28$ et $-.31$ $ps < .05$). Ces régressions linéaires entre $\int EMG_{BF}$ et les trois variables Acc , ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} sont aussi significatives dans les conditions de préparation neutre et sélective (*Préparation neutre* : $R = -.44, .37$ et $-.24$, et *Préparation sélective* : $R = -.30, .27$ et $-.29$ $ps < .01$).

Les corrélations entre la variable Acc et ΔCP_{avant} dans les trois conditions de préparation (*aucune, neutre* et *sélective*) sont significatives ($R = .49, .59$ et $.55$, $ps < .001$, respectivement). De plus, les forts coefficients de corrélation entre Acc et ΔCP_{pic} ($R = -.62, -.73$ et $-.63$, $ps < .001$, respectivement) par rapport à la condition de *Délestage* ($R = .19, .36$ et $.27$, respectivement) laisse supposer que l'accélération des bras perturbe davantage la stabilité posturale du corps. De plus, les corrélations significatives entre les variables ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} vs. $\int EMG_{ES}$ et $\int EMG_{BF}$ suggèrent une plus grande instabilité du corps grâce à une inhibition anticipée des deux muscles posturaux qui reste présente même si aucun délestage n'apparaît.

Une préparation posturale qui n'a pas lieu d'être, reste présente lors de la condition de Non Délestage. Elle a pour objectif la minimisation de la perturbation posturale. Cependant, comme le délestage n'apparaît pas, cette réponse posturale engendre une instabilité posturale.

3.1.4. Temps de réaction

Afin d'analyser l'effet d'une information préalable sur la préparation motrice et posturale, une analyse de variance à deux facteurs (2 perturbations posturales \times 3 niveaux de préparation) a été utilisée sur le TR. Les résultats montrent une interaction significative entre la condition de perturbation posturale et le niveau de la préparation [$F_{(2,14)}=4.8$, $p<.05$]. L'analyse post-hoc révèle un TR plus court lors d'une condition de *Préparation sélective* avec *Délestage* que lors d'une condition 1) *Aucune préparation* quelle que soit la présence du délestage, et 2) *Préparation neutre* avec *Délestage* (281.4 ± 29 ms, 312.7 ± 28.7 ms, 309.8 ± 20 ms et 310.3 ± 24 ms, $ps<.01$, respectivement). Aucune différence de TR n'est observée entre la condition *Aucune préparation* et *Préparation neutre* quelle que soit la condition de perturbation posturale (310.3 ± 24 vs. 298.9 ± 27.4 ms dans la condition *Non Délestage* et 312.7 ± 28.7 vs. 309.8 ± 20 ms en condition de *Délestage*, respectivement) (cf. Figure V-8).

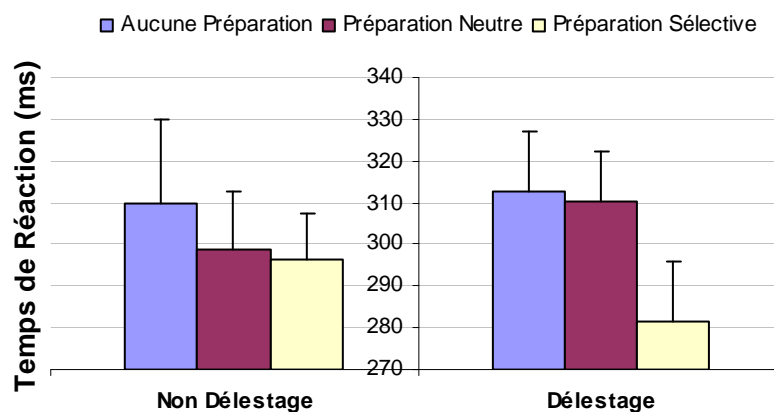


Figure V-8 : Évolution du TR en fonction de la perturbation posturale et du niveau de la préparation.

La diminution du TR dans la condition de *Préparation sélective* suggère une prise en compte de l'information indiquant le délestage. Ce constat montre une utilisation active de l'information durant la PP afin de préprogrammer la réponse posturale.

Les résultats montrent que le TR est le plus court dans la condition de Préparation sélective, signe d'une utilisation de cette information au cours de la PP pour préprogrammer la réponse posturale lors du délestage.

3.2. Effets de la période préparatoire aléatoire lors du délestage

Dans cette seconde partie des résultats, nous avons analysé les effets de la présentation aléatoire de la durée de la PP sur la coordination posture/mouvement. Cette analyse a été effectuée dans un second temps puisque nous ne pensions pas que 5 essais par condition (voir méthode) apporteraient des résultats significatifs. La condition *Aucune préparation* n'a pas été incluse dans le plan expérimental puisque seulement 2 essais par durée de la PP étaient présents. Par conséquent, une analyse de variance ANOVA à deux facteurs 2 Préparations (*Neutre* vs. *Sélective*) \times 4 Durées de la PP (PP_{300} , PP_{500} , PP_{700} et PP_{900}) a été appliquée sur les données issues de la condition de *Délestage*.

3.2.1. Stabilité posturale et Accélération des bras

L'analyse du déplacement maximal vers l'avant (ΔCP_{avant}) montre un effet significatif de la nature de la préparation et de la durée de la PP ($[F_{(1,7)}=17.9, p<.05]$ et $[F_{(3,21)}=.005, p<.05]$, respectivement). Bien que ΔCP_{avant} soit plus petit lors de la *Préparation sélective* par rapport à la *Préparation neutre*, cette variable est plus importante dans la condition de PP 700 ms par rapport à celles de PP_{300} et PP_{500} (4.6 ± 3.3 vs. 2.7 ± 3 et 2.4 ± 2.5 mm $ps<.01$, respectivement).

L'anova basée sur le déplacement maximal arrière ($\Delta CP_{arrière}$) ne montre qu'un effet simple de la durée de la PP $[F_{(3,21)}=5.6, p<.01]$. $\Delta CP_{arrière}$ est plus important lors de la PP_{700} par rapport à la PP_{300} et la PP_{500} (-1.8 ± 3.1 mm vs -1.5 ± 3.4 mm et -1.6 ± 3.2 mm, $ps<.05$, respectivement).

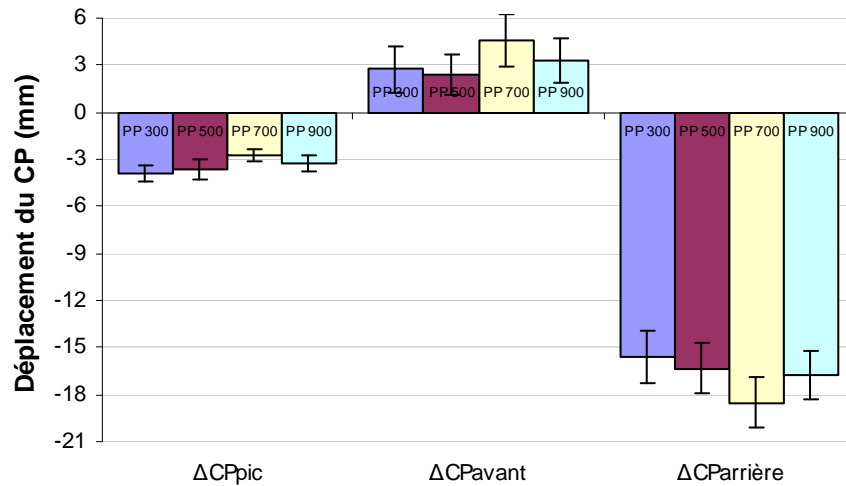


Figure V-9 : Déplacement du CP (mm) en fonction de la durée de la PP.

Représentation de l'effet de la durée de la PP sur les 3 variables issues du déplacement du CP (ΔCP_{pic} , ΔCP_{avant} et $\Delta CP_{arrière}$). Les effets des APAs (ΔCP_{pic}) sont moins importants dans la condition PP₇₀₀ avec une augmentation de l'instabilité posturale représentée par les variables ΔCP_{avant} et $\Delta CP_{arrière}$.

Enfin, l'anova concernant les effets des APAs sur le déplacement du CP (ΔCP_{pic}) montre un effet simple de la durée de la PP [$F_{(3,21)}=10.6$, $p<.001$]. L'analyse post-hoc montre une amplitude du ΔCP_{pic} plus faible lors de la PP₇₀₀ par rapport à la PP₃₀₀ et la PP₅₀₀ ($-2.7 \pm .7$ mm vs. -3.9 ± 1 mm et -3.6 ± 1.2 mm, $ps<.005$, respectivement). De plus, cette amplitude augmente de la PP₇₀₀ à la PP₉₀₀ ($-2.7 \pm .7$ mm vs. -3.3 ± 1 mm, respectivement, $p<.05$).

L'amplitude de déplacement du CP entre ΔCP_{pic} et ΔCP_{avant} (ΔCP_{pic} à pic) montre une tendance à l'effet simple de la condition de préparation et de la durée de la PP ($F_{(1,7)}=4.6$, $p=.07$ et $F_{(3,21)}=3$, $p=.055$, respectivement). Cette amplitude semblerait décroître lors d'une *Préparation sélective* par rapport à une *Préparation neutre* avec une augmentation de la PP₅₀₀ à la PP₇₀₀.

Les résultats montrent un effet moins important des APAs dans la condition PP₇₀₀. Il s'ensuit une augmentation de l'instabilité posturale représentée par les variables ΔCP_{avant} et $\Delta CP_{arrière}$. La condition de Préparation neutre semblerait diminuer cette stabilité posturale au regard du déplacement maximal du CP vers l'avant.

Afin de quantifier la perturbation posturale au niveau des bras lors du délestage, une analyse de variance ANOVA a été utilisée sur l'amplitude maximale de l'accélération des bras 2 niveaux de préparation (*Neutre* et *Sélective*) \times 4 durées de la PP (PP₃₀₀, PP₅₀₀, PP₇₀₀ et

PP_{900}). Les résultats montrent un effet significatif de la durée de la PP [$F_{(3,21)}=7.8$, $p<.001$]. Le test post-hoc montre une accélération des bras plus importante dans la condition PP_{700} par rapport à la condition PP_{300} et PP_{500} (25 ± 2.8 vs. 22.8 ± 3 et 23.6 ± 3.1 m/s^2 , $p<.01$, respectivement). De plus, nous pouvons observer une tendance à la diminution de cette accélération dans la condition de *Préparation sélective* par rapport à la *Préparation neutre* [$F_{(1,7)}=4.9$, $p=.06$] (cf. Figure V-10).

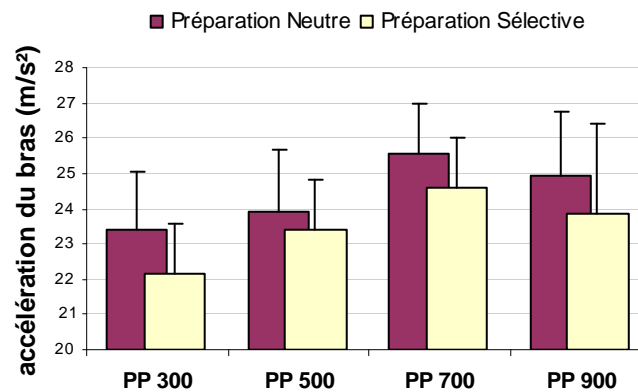


Figure V-10 : Accélération du bras (m/s^2) en fonction de la PP et du niveau de la préparation.

La diminution de la stabilité posturale lors de l'utilisation d'une PP de 700 ms observée sur le déplacement du CP semble se retrouver au niveau de la stabilité des bras. Nous retrouvons aussi cette tendance à l'instabilité posturale dans la condition de Préparation neutre par rapport à la Préparation sélective.

3.2.2. Données électromyographiques en fonction de la PP

L'absence d'une modification de l'activité électromyographique du SOL (EMG_{SOL}) observée Figure V-5, page 106, nous a permis d'effectuer une analyse de variance avec 2 Préparations (*Neutre* et *Sélective*) \times 2 Muscles posturaux (*ES* et *BF*) \times 4 Durées de la PP (PP_{300} , PP_{500} , PP_{700} et PP_{900}). Les résultats montrent un effet simple de la durée de la PP [$F_{(3,21)}=3.8$, $p<.05$]. L'inhibition des muscles ES et BF dans la fenêtre de -150 ms à t_0 est moins importante lors de la PP_{700} par rapport à la PP_{300} et la PP_{500} , elle représente 86.7 ± 15.7 % vs. 78.4 ± 13.3 % et 78.7 ± 14.2 % de l'activité basale, respectivement ($p < .05$).

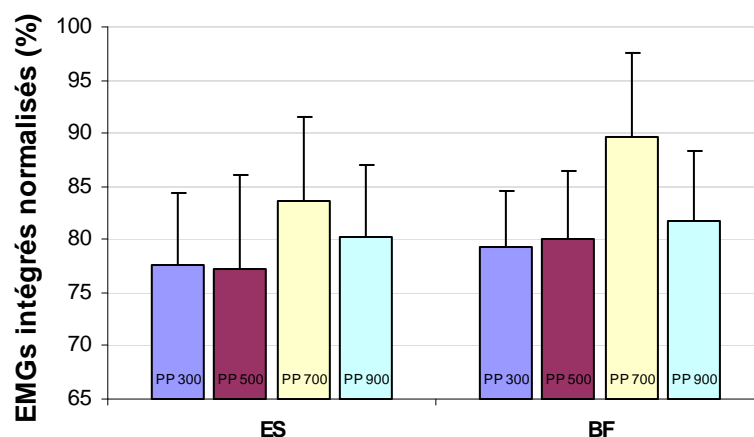


Figure V-11 : Évolution de l'activité EMG intégrée en fonction de la durée de la PP.

Le pourcentage de l'activité EMG des différents muscles est plus important dans la condition PP₇₀₀ ce qui suggère une inhibition moins importante durant la fenêtre d'analyse de -150 ms à t_0 par rapport à l'activité basale du muscle.

3.2.3. Temps de réaction

L'anova sur le TR met en évidence un effet simple de la nature de la préparation [$F_{(1,7)}=9.8$, $p<.05$] et de la durée de la PP [$F_{(3,21)}=5.5$, $p<.01$]. Le TR diminue de la *Préparation neutre* à la *Préparation sélective* et de la PP₃₀₀ à la PP₇₀₀ ms, ce qui montre une préparation plus importante lors de la *Préparation sélective* et lors de la PP₇₀₀ (310 ± 14 vs. 276.7 ± 17.5 ms et 309 ± 28 vs. 276.5 ± 25.2 ms, respectivement, $ps<.05$).

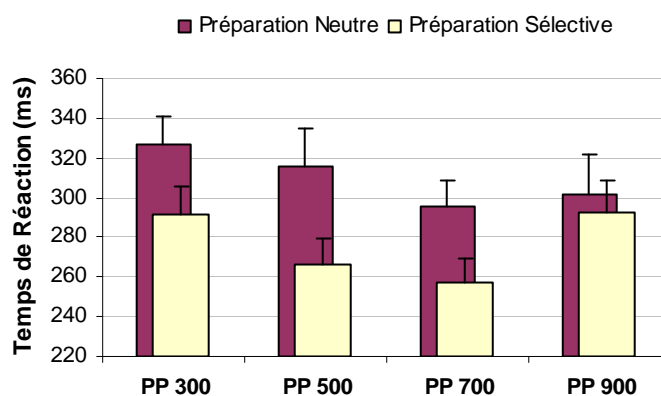


Figure V-12 : Évolution du TR en fonction de la durée de la PP et du niveau de la préparation.

4. DISCUSSION

4.1. Effets de la nature de la préparation lors du délestage

Le résultat principal de cette étude concerne la diminution du déplacement du CP lorsqu'une information est présentée durant le SP (c'est-à-dire, lors d'une *Préparation sélective*) par rapport à la condition où aucune information n'est donnée au sujet (condition *Aucune préparation*). Lorsque l'information sur le délestage est donnée durant le SP, on assiste en effet à une diminution du déplacement maximal du CP vers l'avant (ΔCP_{avant}) ainsi qu'à un déplacement maximal moins important vers l'arrière ($\Delta CP_{\text{arrière}}$). Comme l'en atteste les régressions linéaires, la minimisation du déplacement du CP (ΔCP_{avant}) proviendrait d'une plus grande amplitude de déplacement du CP 100 ms après t_0 (ΔCP_{pic}). L'analyse électromyographique permettant de quantifier les APAs permet d'expliquer ce résultat. Nous assistons en effet à une inhibition de l'activité des muscles posturaux *Erector Spinae* et *Biceps Femoris* durant la fenêtre d'analyse de -150 ms à t_0 et ce quelle que soit la condition de perturbation posturale. Cependant, des différences subsistent. Dans la condition de *Non Délestage*, l'information sur l'absence de perturbation posturale arrivant plus tôt dans le temps (pendant le SP vs. pendant le SI : *Préparation sélective* vs. *Préparation neutre*), nous assistons à une tendance dans la diminution des APAs. L'activité d'inhibition des muscles posturaux est atténuée et semble se rapprocher de l'activité de base. Par opposition à la condition de *Non Délestage*, lorsque l'information sur la perturbation posturale arrive plus tôt dans le temps, nous assistons cette fois-ci à une augmentation de l'inhibition des muscles posturaux. Les résultats des régressions linéaires montrent que l'augmentation de cette activité d'inhibition musculaire engendre un déplacement plus important du CP après t_0 . Le SNC serait donc capable de prendre en compte une information sur la perturbation posturale afin de mettre en place une commande en Feedforward adaptée à la situation. Ainsi, nous pouvons en déduire que le SNC est capable d'utiliser activement l'information présente durant la PP afin de préprogrammer les APAs ***lorsque et uniquement lorsque*** le TR associé diminue. L'utilisation de cette information durant la PP (*Préparation sélective*) permet de mieux stabiliser le segment directement impliqué par le délestage, à savoir, les bras. En effet, l'accélération maximale verticale des bras est moins importante dans la condition de *Préparation sélective* par rapport aux deux autres conditions. Depuis les travaux pionniers de Woodworth (1899), la nature de la phase initiale du mouvement a été considérée comme étant purement balistique donc dépendant d'une préprogrammation (Keele, 1981 ; Mackenzie et al.,

1987 ; Martenuik et al., 1987 ; Meyer et al., 1988 ; Plamondon et Alimi, 1997). Nous pouvons donc supposer qu'une inhibition anticipée des antépulseurs de l'épaule (*Deltoïdus anterior*) est mise en place afin de limiter cette perturbation posturale (Hugon et al., 1982).

La méthodologie utilisée dans cette expérimentation est intéressante dans la mesure où le mouvement focal utilisé pour le *Délestage* ou le *Non Délestage* est identique pour toutes les conditions. Le sujet devait relâcher un bouton avec l'index droit, action qui engendrait ou non le délestage suivant les conditions d'information et donc de préparation. Par conséquent, *l'incertitude événementielle était portée sur les conséquences de l'action focale (i.e., la posture) et non sur l'action focale à réaliser* comme dans les deux premières expérimentations, i.e., élévation du bras droit ou du bras gauche engendrant la perturbation posturale. Nous supposons donc que la programmation du mouvement focal (c'est-à-dire, l'extension de l'index) est identique pour toutes les conditions. Par conséquent, l'évolution du TR observée en fonction de la condition de préparation reflèterait les processus de programmation de la réponse posturale. Bien que la majorité des résultats issus des données posturales ne montre pas de différence significative entre la condition de *Préparation sélective* et *neutre* (exceptées la diminution du déplacement maximal vers l'avant ΔCP_{avant} et la tendance à la diminution de la variable $\Delta CP_{\text{pic à pic}}$), nous observons une diminution du TR associé. L'initiation du délestage est plus rapide après l'apparition du SI lors de la *Préparation sélective* par rapport à la *Préparation neutre*. Puisque nous observons 1) un TR plus court pour programmer la réponse posturale, et 2) une production d'APAs plus importante lors de la *Préparation sélective* par rapport à la *Préparation neutre*, nous pouvons en déduire que le SNC est capable d'utiliser l'information présente durant la durée de la PP pour préprogrammer les APAs. Ainsi, il existerait une préparation spécifique de la commande posturale par rapport à la commande focale. La coordination entre la posture et le mouvement se ferait par le biais de deux commandes centrales parallèles. Lors de la *Préparation neutre*, le sujet ne peut utiliser la PP pour préprogrammer les APAs, il s'ensuit donc une augmentation du TR par rapport à la condition de *Préparation sélective* traduisant un temps additionnel pour programmer les APAs. Dans cette condition, la réponse posturale n'est préparée qu'après l'apparition du SI. Nos résultats confirment les travaux précédents. Lacquaniti et Maoli (1989) ont démontré que la coactivation réflexe et anticipée est planifiée centralement en préparation d'une tâche « attraper de balle » afin de stabiliser la posture après l'impact. De plus, une information indiquant une perturbation posturale produite par une translation antérieure ou postérieure de la plate forme de force réduirait le temps de latence des muscles

croisant l'articulation de la cheville, le tibialis anterior et le gastrocnémus lateralis (McChesney et al., 1996). Ces différents résultats sont en accord avec le schéma proposé par Woollacott et al., (1984). Ce schéma (Figure VII-1, page 151) repose sur le principe d'une sélection de la synergie posturale durant la PP lorsque des informations sur la perturbation posturale sont à disposition avant le SI.

4.2. Préparation posturale lors du non délestage

Si les APAs proviennent d'une commande centrale identique à celle du mouvement focal, nous devrions observer une augmentation du TR dans une condition de *Non Délestage* par rapport à a condition de *Délestage*. Cette seconde hypothèse selon laquelle le TR augmente en fonction de la production des APAs n'est pas vérifiée. L'analyse du TR ne montre pas d'effet simple de la condition de perturbation posturale. Cette absence d'effet peut être expliquée par la présence d'APAs même si le délestage n'apparaît pas. En l'absence de délestage, le sujet ne devrait préparer que la réponse focale, le relâchement du bouton avec l'index droit. Cependant, les résultats montrent une accélération des bras vers le bas suggérant une inhibition anticipée du *Deltoïdus Anterior* avec un déplacement du CP vers l'arrière associée à une inhibition anticipée des *Erector Spinae* et du *Biceps Femoris*. Le sujet initiait donc une réponse posturale alors que la perturbation posturale n'apparaissait pas, il s'ensuivait donc un déséquilibre du corps. Le sujet développait donc une stratégie de sécurité qui consistait à préparer une réponse posturale même si aucune perturbation n'apparaissait. Cette stratégie de sécurité permettait au sujet de réaliser la tâche avec une perturbation posturale acceptable (déplacement du CP inférieur à 1cm). La mise en place de cette stratégie suggère fortement que le délestage d'un poids de 5 Kg perturbe l'équilibre du corps si une telle stratégie n'est pas adoptée. En d'autres termes, le sujet peut tomber si cette stratégie n'est pas engagée.

4.3. Préparation motrice et posturale

L'utilisation d'un poids de 5 Kg contraint le sujet à adopter une stratégie posturale même si aucune perturbation posturale n'est associée. En condition de *Délestage*, cette préparation posturale semble prendre place durant la PP lorsqu'une information est mise à disposition avant le SI (*Préparation sélective* vs. *Aucune préparation* et *Préparation neutre*). Durant ces deux dernières conditions de préparation, la préparation posturale semble se faire

après l'apparition du SI comme l'en atteste l'augmentation du TR. En comparant les différents niveaux de la préparation, nous observons des APAs plus importants en condition de *Préparation sélective* associés à une diminution du TR (augmentation du déplacement maximal arrière 100 ms après t_0 , minimisation des déplacements maximaux vers l'avant et vers l'arrière). Ces résultats sont donc en contradiction avec les travaux montrant des APAs plus faibles associés à un TR plus court en comparant une tâche de TRS à une tâche de TRC (Benvenuti et al., 1997 ; Slijper et al., 2002). La tâche de TRS implique une connaissance de tous les paramètres du mouvement excepté le moment de son déclenchement alors qu'une tâche de TRC implique en plus de cette contrainte temporelle, un paramètre manquant de la réponse focale. Ainsi l'incertitude du mouvement focal augmente d'une tâche de TRS à une tâche de TRC. Ces études mettent donc en évidence une augmentation des APAs en fonction de l'incertitude du mouvement focal. Ces résultats vont dans le sens des travaux démontrant une corrélation entre l'augmentation du TR associé à une augmentation de la latence des APAs (Lee 1980 ; Cordo and Nashner, 1982 ; De Wolf et al. 1998 ; Dietz et al. 2000 ; Cuisinier et al. 2005). Comme nous l'avons vu précédemment, nos résultats montrent une diminution des APAs lors de la diminution de l'incertitude. La différence de ces résultats peut être expliquée par le locus de la préparation de la réponse. Dans notre étude, l'information donnée au sujet portait sur la probabilité d'apparition d'une perturbation posturale alors que les études antérieures utilisaient une incertitude non pas portée sur les conséquences de l'action focale mais sur l'action focale en elle-même (pousser ou tirer une poignée, déplacer un objet vers des cibles... etc.). Par conséquent, la relation entre les APAs et l'incertitude du mouvement focal serait différente de la relation entre les APAs et l'incertitude issue de la perturbation posturale. En d'autres termes, la coordination entre la posture et le mouvement serait dépendante du locus de la préparation et de l'information donnée durant le SP. Lorsque l'incertitude du mouvement augmente, les APAs seraient plus importants. Lorsque l'incertitude de la perturbation posturale augmente, les APAs seraient réduits. Par conséquent, la commande en FeedForward pourrait être modifiée en fonction de l'incertitude temporelle et événementielle 1) basée sur le mouvement focal engendrant une perturbation posturale ou 2) basée sur la perturbation posturale elle-même.

4.4. Réponse posturale et focale en fonction de la PP

Depuis les travaux de Woodrow (1914), il est reconnu que le TR est dépendant du temps alloué à la Période Préparatoire (PP). Lorsque cette durée de la PP est modifiée dans

des blocs d'essais séparés, le TR le plus court est obtenu pour une PP de 500 ms, appelé « Période Préparatoire Optimale » (Bertelson, 1967 ; Bertelson et Tisseyre, 1969 ; Posner et Boies, 1971 ; Hasbroucq et al., 1997). Lorsque la durée de la PP est présentée de manière aléatoire dans un bloc d'essai, nous observons une évolution différente. Le TR diminue en fonction de l'augmentation de la durée de la PP (Niemi et Näätänen, 1981 ; Requin et al., 1991 ; Mattes et Ulrich, 1997). La différence de relation entre la durée de la PP et le TR en fonction du mode de présentation (aléatoire ou bloquée) reflète des stratégies différentes de la préparation. Lors du mode de présentation bloqué, l'augmentation du TR en fonction de la durée de la PP reflèterait une détérioration progressive de la capacité du sujet à estimer avec précision l'apparition du SI (Théorie du temps scalaire de Gibbon, 1984). Ainsi, une détérioration de la synchronisation de la préparation de la réponse apparaît à mesure de l'augmentation de la durée de la PP. En d'autres termes, l'estimation du moment d'apparition du SI se dégrade lorsque la durée de la PP est importante. Lors d'une présentation aléatoire de la durée de la PP, l'estimation du moment d'apparition du SI n'est pas une stratégie adéquate. L'écoulement du temps est une information en soi. Plus la durée de la PP est importante plus la probabilité d'apparition du SI augmente à mesure que le temps s'écoule. Le sujet peut ainsi utiliser cette probabilité afin de préparer au mieux la réponse. Ainsi, on observe une diminution du TR en fonction de l'augmentation de la PP.

L'utilisation d'une présentation aléatoire de la durée de la PP dans un bloc d'essais ne modifie pas les résultats obtenus lorsque la durée de la PP est invariante (Cuisinier et al., 2005). Nous observons un décalage de l'optimum de préparation de 500 ms à 700 ms lorsque le sujet est debout quelle que soit la nature de la préparation (neutre ou sélective) et le mode de présentation de la PP (constant vs. aléatoire). Ces résultats sont différents de ceux obtenus dans les études portant sur l'analyse du TR sans contrainte posturale, i.e., assis sans effet perturbateur de la réponse focale sur l'équilibre postural (Bertelson, 1967 ; Bertelson et Tisseyre, 1969 ; Posner et Boies, 1971 ; Hasbroucq et al., 1997). En effet, notre étude montre que le TR diminue d'une PP de 300 ms à 700 ms puis augmente lors d'une PP de 900 ms lorsque le sujet est debout. Par conséquent, cette évolution mettrait en évidence un processus passif, indépendant de toutes stratégies de la part du sujet comme le suggère les travaux de Woodrow (1914). Ce phénomène ne serait pas modifié en fonction de la nature de la préparation (neutre vs. sélectif) ni en fonction du mode de présentation de la durée de la PP (aléatoire vs. bloqué).

Aucune interaction entre la durée de la PP et la nature de la préparation (neutre vs. sélective) n'a été trouvée concernant les variables posturales. Lorsque le TR est le plus court (PP₇₀₀), nous assistons à une diminution des APAs mise en évidence par une diminution de l'inhibition des muscles posturaux ES et BF associés à une diminution de ces effets sur le déplacement du CP (diminution du ΔCP_{pic}). Cette diminution des APAs lors de cette durée de la PP amène une augmentation de l'instabilité posturale observée grâce à l'augmentation du déplacement maximal du CP vers l'avant et vers l'arrière. Cette augmentation de l'instabilité posturale s'observe aussi au niveau des bras puisque l'accélération verticale des bras est plus importante lors de la PP₇₀₀ par rapport à la PP₃₀₀. Deux hypothèses peuvent expliquer ces résultats. La première hypothèse concerne la diminution des APAs qui proviendrait d'une stratégie délibérée de la part du sujet afin de privilégier l'exécution du mouvement focal au détriment de l'équilibre postural. Le sujet pourrait ainsi gagner du temps à limiter la préparation des APAs afin de réagir le plus vite possible quelle que soit la nature de la préparation et du mode de présentation de la PP. La deuxième hypothèse concerne directement un effet de la durée de la PP sur la réponse. Dans des tâches de presse-bouton dans une position assise, la durée de la PP posséderait un effet moteur. Elle affecterait la force de la réponse (Mattes & Ulrich, 1997 ; Van der Lubbe et al., 2004) ainsi que le temps moteur (Hasbroucq et al., 1995 ; Tandonnet et al., 1997). La force de la réponse analysée grâce à la force appliquée sur un bouton serait moins importante lorsque le TR est court. Cette hypothèse peut s'étendre au niveau postural. La diminution des APAs observée lors de la manipulation de la PP pourrait refléter cet effet. La force générée par la commande posturale serait moins importante lorsque la période préparatoire est optimale. Si cette hypothèse s'avère exacte, cela impliquerait que l'effet de la durée de la PP sur le locus moteur serait global et indépendant des deux commandes posturale ou focale.

En conclusion, la présente expérimentation montre une plus grande stabilité avec un TR le plus court lorsque une information préalable sur la perturbation posturale est donnée au sujet avant le SI. Le sujet effectuerait donc une préparation posturale efficace durant la période préparatoire. Cependant, une réponse posturale est observée quelle que soit la condition de perturbation posturale (*Délestage* ou *Non Délestage*), n'engendrant aucune augmentation du TR attendu. Cette préparation posturale est une stratégie de sécurité qui 1) assure une stabilité posturale plus importante lors du délestage, et 2) crée une perturbation posturale lorsque le délestage n'apparaît pas. Enfin, le mode de présentation de la PP aléatoire ainsi que la nature de la préparation ne modifient pas l'évolution du TR en fonction de la

durée de la PP. Lors de l'optimum de préparation, nous observons une diminution des APAs mettant ainsi en évidence une propriété intrinsèque de la coordination entre la posture et le mouvement en fonction de la contrainte temporelle de la préparation (i.e., durée de la PP).

CHAPITRE VI: EFFET DE L'ÂGE ET D'UNE REPROGRAMMATION DU MOUVEMENT FOCAL SUR LES APAS

1. INTRODUCTION

L'incertitude temporelle créée par la présentation aléatoire des différentes durées de la PP semble influencer la coordination entre la posture et le mouvement. Bien que le SNC soit en mesure d'utiliser une information durant la PP afin de minimiser la perturbation posturale engendrée par le mouvement, il semble que la commande en Feedforward soit retardée au profit d'une réactivité plus importante de la commande focale lors d'une préparation optimale. Cette étude a pour volonté de montrer une modification de cette relation en fonction de l'âge. L'évolution du TR en fonction de l'âge est désormais bien connu grâce à la multitude d'études existant sur le sujet (Welford, 1984 et Salthouse, 1985 cités par Stelmach et al., 1990 ; Stelmach et al., 1987). Lorsqu'il existe une opportunité de préparer une réponse à l'avance, les performances des séniors semblent identiques aux jeunes adultes. Cependant, lorsqu'ils sont placés dans une situation de sélection d'une réponse parmi plusieurs, leur performance est considérablement affectée (Larish et al., 1982 ; Gottsdanker, 1982 ; Goggin & Stelmach, 1990 ; Stelmach et al., 1990). Une des caractéristiques majeures de cette population montre une lenteur au niveau du TR et du mouvement produit. A notre connaissance, très peu d'études ont analysé le TR en fonction de la durée de la PP chez les séniors dans une tâche de pointage en condition assise (Amrhein et al., 1991). Ces auteurs ont montré que l'optimum de préparation n'est pas dépendant de l'âge. Quelle que soit la tâche (TRS, TRC), nous retrouvons un optimum de préparation à 500 ms. Cependant, des différences sont mises en évidence lors d'une reprogrammation. En effet, l'optimum de préparation n'est pas modifié chez les jeunes adultes lors de la reprogrammation du bras. La manipulation de la durée de la période préparatoire montre chez les séniors une absence d'optimum dans cette condition suggérant ainsi un déficit dans la restructuration du programme moteur.

Dans le domaine postural, l'effet de l'âge est connu pour augmenter le degré d'instabilité via une diminution de la production d'APAs (Horak et al., 1984 ; Woollacott et al., 1988 ; Rogers et al., 1992 ; Woollacott, 1993 ; Woollacott et al., 1993 ; Bleuse et al., 2005). En manipulant des tâches de TRS et de TRC dans deux conditions posturales assise et debout, Stelmach et al. (1990) ont montré une augmentation du TR plus importante chez les

séniors en fonction de la condition posturale (assis vs. debout). Ces auteurs ont ainsi suggéré que les processus de stabilisation posturale contribuaient à l'augmentation du TR, cette dernière n'étant pas uniquement affectée par une dégradation des processus de traitement de la réponse focale avec l'âge.

Les processus de préparation de la réponse focale et de la composante posturale semblent se dégrader avec l'âge. De plus, le contrôle de la stabilité posturale semble prendre une part plus importante dans la coordination entre la posture et le mouvement comme en attesterait l'augmentation plus importante du TR en condition debout par rapport à la condition assise. L'objectif de cette étude est d'étudier la coordination posture-mouvement sous contrainte temporelle de préparation dans le cadre d'une programmation ou reprogrammation du mouvement focal en fonction de l'âge.

Puisque les processus de préparation sont dégradés avec l'âge, nous supposons une diminution de l'effet de la durée de la PP sur la coordination entre la posture et le mouvement. Si l'hypothèse d'une programmation des APAs durant la durée de la PP s'avère exacte, une reprogrammation du mouvement devrait conduire à une diminution des APAs suggérant une instabilité posturale plus importante.

2. METHODE

2.1. Sujets

L'expérience a été réalisée grâce à la participation de deux populations de sujets d'âge différent et droitiers sans antécédents moteurs ou neurologiques.

La population « jeune » était composée de 8 individus, 4 femmes (âge moyen 25.2 ± 1.3 ans de poids 57.8 ± 5.7 Kg et de taille 168.8 ± 8.2 cm) et 4 hommes (âge moyen 27 ± 1.4 ans de poids 72.2 ± 19.9 Kg et de taille 176.3 ± 11.4 cm).

La population « sénior » était composée d'autant d'individus comprenant 3 hommes (âge moyen 68.7 ± 6.3 ans de poids 79 ± 7.3 Kg et de taille 180.3 ± 3.8 cm) et 5 femmes (âge moyen 66.2 ± 4.9 ans de poids 64 ± 11.9 Kg et de taille 161 ± 3.3 cm).

2.2. Matériel

Le protocole expérimental s'est basé sur la première expérimentation mise à part quelques variantes concernant la procédure expérimentale. Deux configurations posturales ont

été utilisées, une posture *Assis* et une posture *Debout*. Durant le maintien bipodal, les sujets étaient placés sur une plate-forme de force (modèle AMTI OR-6), les bras le long du corps, les mains en supination à 90°. Lors de la deuxième configuration posturale, les sujets étaient assis sur une chaise avec dossier, les jambes dans le prolongement du corps, les pieds placés suivant des marques tracées au sol de telle manière à obtenir un angle de 90° au niveau des genoux. Les bras et les mains étaient positionnés dans la même configuration que la condition debout. Les signaux provenant de la plate-forme de force ont permis l'enregistrement 1) des forces de réaction suivant l'axe vertical (F_z), et 2) de deux moments dans le plan sagittal (M_y) et frontal (M_x). Un accéléromètre unidirectionnel (modèle Entran EGCS-DO-5-/L2M avec une sensibilité de 32 mV/g) a été placé sur la face dorsale de la main droite au niveau de l'articulation métacarpophalangienne du pouce. Des électrodes de surface bipolaires ont été utilisées pour l'enregistrement de l'activité EMG des muscles suivants : le *deltoïdus anterior*, muscle responsable du mouvement focal et quatre muscles posturaux, *Erector Spinae* controlatéral au mouvement d'élévation du bras (ES), le *Biceps Femoris* ipsilatéral (BF), le *Soleus* (Sol) et le *Tibialis anterior* (TA) ipsilatéraux.

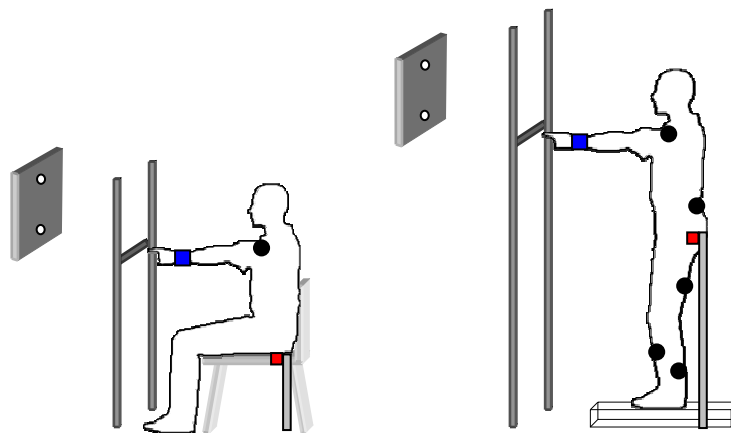


Figure VI-1: Illustration du matériel et de la procédure utilisées.

Exécution de l'élévation d'un bras à l'horizontale dans les deux conditions posturales. Les **carrés bleus** représentent le poids et l'accéléromètre placés au niveau du poignet droit. La tâche consistait à relâcher un bouton poussoir de deux manières différentes : soit en exécutant un mouvement d'élévation du bras à l'horizontale soit en relâchant le bouton avec un mouvement partant le plus faible possible de l'épaule. En condition debout, les sujets étaient placés sur une plate forme de force avec un enregistrement électromyographique du ES, BF, Sol et TA (**cercles noirs**). L'activité électromyographique du deltoïdus anterior a été enregistrée pour obtenir le temps préMOTEUR dans les deux conditions posturales. Le bouton-poussoir ainsi que son support étaient présents dans les deux conditions posturales (**carré rouge**).

Deux diodes électroluminescentes rouges (\varnothing 0.8 cm) ont été insérées et espacées à 18 cm l'une de l'autre sur une planche (30 × 80 cm) suivant l'axe vertical. Cette planche était placée à 150 cm devant le sujet, alignée par rapport au centre du corps et à hauteur des yeux. Les sujets portaient des bracelets de 1 kg au niveau du poignet droit afin d'augmenter la perturbation posturale consécutive à la production du mouvement. Un bouton-poussoir était placé sur un support indépendant et positionné de façon à ce que l'articulation métacarpienne distale de l'auriculaire puisse appuyer dessus. Le moment où le bouton était relâché a été défini comme étant t_0 . Une cordelette délimitant l'amplitude maximale du mouvement d'élévation des bras a été placée à hauteur d'épaule, à 5 cm de la main.

Tous les signaux ont été enregistrés à une fréquence de 1000 Hz avec une résolution de 12 bits/s. Le système Datac a permis de contrôler l'expérimentation et de synchroniser les signaux issus des différents capteurs.

2.3. Procédure et conditions expérimentales

Durant cette expérimentation, trois variables indépendantes ont été manipulées : la condition posturale (Assis vs. Debout), la validité de la préparation (Valide vs. Non-valide) et la durée de cette préparation (PP₃₀₀, PP₅₀₀, PP₇₀₀ et PP₉₀₀).

Une fois la posture stabilisée, le bras droit le long du corps, l'articulation métacarpienne distale appuyée sur le bouton-poussoir, les sujets devaient relâcher ce dernier de deux manières différentes en réponse à deux signaux visuels consécutifs générés par le système Datac. Ces deux signaux correspondaient à un signal préparatoire (SP) suivi d'un signal impératif (SI), tous deux présentés durant 100 ms. Les sujets devaient réagir le plus rapidement possible au SI en 1) décollant la main du bouton grâce à un mouvement très faible partant de l'épaule (la main devait rester dans le prolongement du bras) ou 2) levant le bras droit à vitesse maximale jusqu'à la cordelette en fonction de la position d'apparition du SI (cf. Figure VI-2, page 125).

Le sujet devait conserver la position finale jusqu'au signal auditif « OK ». Nous avons manipulé une *préparation sélective*¹¹ grâce à l'utilisation d'une procédure de priming (Rosenbaum & Kornblum, 1982). Nous avons joué sur un seuil de probabilité de 80% vs. 20%. Ainsi, dans 80% des essais, le SI confirmait l'information donnée pendant le SP sur le mouvement à produire. Il s'agissait de la condition de préparation « Valide ». Par opposition,

¹¹ Cf. Chapitre I:4.3.1. page 17. Cette procédure consiste à donner une information préalable grâce au SP sur le mouvement à produire (relâcher le bouton ou lever le bras), information qui est biaisée par un indice de probabilité.

dans 20% des essais, le SI était du côté opposé au SP, condition de préparation définie comme étant « *Non-Valide* ». La proportion d'essais valides/non-valides était identique pour chaque durée de PP et chaque condition posturale.

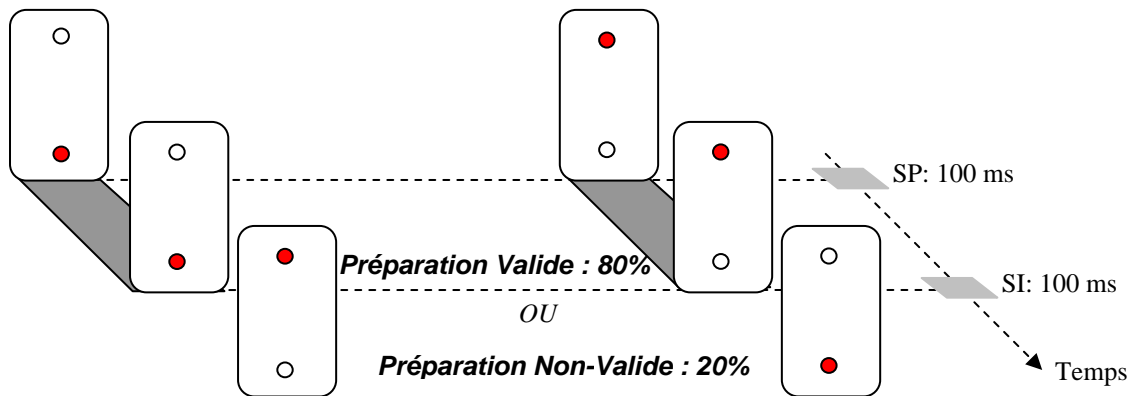


Figure VI-2 : Illustration du protocole d'allumage des LEDs.

Lorsque le signal lumineux (SP) apparaît en bas, le sujet a pour consigne de décoller la main du bouton poussoir grâce à un mouvement du bras de très faible amplitude (*illustration de gauche*). Lorsqu'il apparaît en haut, le sujet doit exécuter l'élévation du bras droit à l'horizontale (*illustration de droite*). Si ce signal est confirmé par le SI (80% des essais), la préparation est dite *Valide*. Si ce signal est infirmé par le SI, les essais correspondent à la condition *Non-Valide* (20% des essais). Le sujet doit effectuer le mouvement correspondant à l'apparition du SI.

Cette expérience était constituée de 16 blocs de 15 essais. Chaque bloc était composé de 15 essais : 12 essais *Valides* et 3 essais *Non-Valides* présentés aléatoirement pour un mouvement donné. Nous avons volontairement dissociés les deux types de mouvement (élévation du bras ou relâcher simplement le bouton-poussoir) en deux blocs d'essais différents afin d'identifier clairement deux types de préparation, une préparation incluant une perturbation posturale : élévation du bras et une préparation d'un mouvement ne provoquant aucune perturbation posturale (relâcher le bouton-poussoir). Chaque condition posturale était donc composée de 8 blocs, 2 blocs par durée de PP. Les 8 blocs par condition posturale étaient présentés de manière aléatoire. Un temps de repos respectif de 5 sec et de 2 min était accordé entre chaque essai et chaque bloc expérimental afin d'éviter toute fatigue. Les sujets effectuaient un essai d'entraînement avant chaque bloc et chaque condition posturale.

2.4. Analyses des Données

Les données ont été analysées grâce au logiciel Matlab.

2.4.1. Analyse électromyographique

Les signaux EMGs ont été rectifiés filtrés grâce à un filtre Butterworth passe-bas d'ordre 2, avec une fréquence de coupure de 1kHz. Le début de l'activité électromyographique de chaque muscle a été déterminée grâce à un programme algorithmique marquant le premier point étant supérieur au seuil défini par la moyenne + deux écart-types de l'activité basale du muscle considéré, et ce, pendant les 30 ms suivantes. Une vérification visuelle du marquage a ensuite été réalisée. Les essais individuels ont ensuite été 1) synchronisés par rapport au moment du début du mouvement identifié par le bouton-poussoir, défini comme étant le t_0 , et 2) redimensionnés de $-400 t_0$ à t_0+1500 ms. Cependant, du fait d'un mouvement n'excédant pas 3 cm lors de la consigne « relacher le bouton poussoir en exécutant un mouvement très léger du bras », nous n'avons pas pu observer d'activité EMG du DA. Pour chaque essai de la condition debout, les APAs ont été quantifiés grâce au temps séparant le début de l'activité du muscle postural par rapport au mouvement permettant de relacher le bouton-poussoir (t_0). Une valeur négative indiquait un APA par rapport à t_0 .

2.4.2. Analyse du mouvement

Les essais individuels ont été 1) synchronisés par rapport au début du mouvement identifié par le bouton, défini comme t_0 , et 2) redimensionné de $-400 t_0$ à t_0+1500 ms.

Les données issues de l'accéléromètre unidirectionnel ont permis de déterminer le pic d'accélération ainsi que le temps pour l'atteindre afin de quantifier l'accélération de l'élévation du bras dans chaque condition.

2.4.3. Analyse du déplacement du centre des pressions

Le déplacement du CP dans le plan antéro-postérieur (CP_y) a été calculé suivant l'équation 5 (page 66).

Trois déplacements ont été calculés depuis la valeur de base 1) jusqu'à la valeur correspondant au temps t_0 (ΔCP_{t_0}), 2) jusqu'au déplacement maximal arrière ($\Delta MinCP_y$), et 3) jusqu'au déplacement maximal vers l'avant ($\Delta MaxCP_y$). De plus, un intervalle temporel a été estimé de t_0 jusqu'au temps représentant $\Delta MinCP_y$ ($tMinCP_y$).

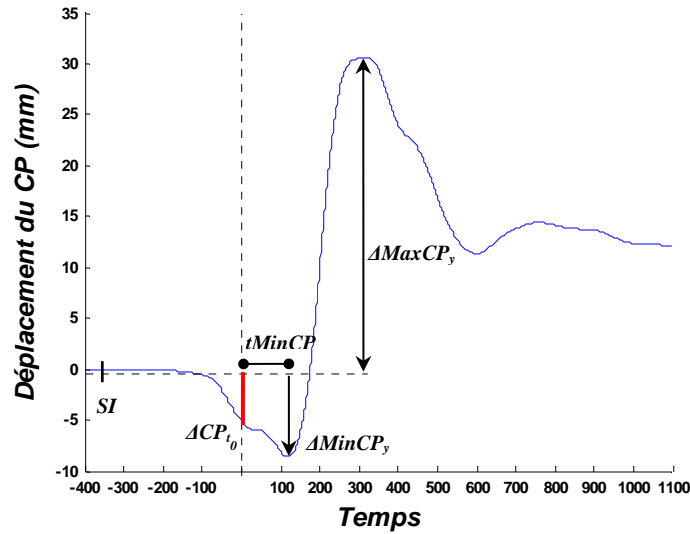


Figure VI-3 : Déplacement antéro-postérieur du CP sur une fenêtre de -400 à +1100 t_0 lors d'un essai concernant une tâche d'élévation du bras droit.

2.5. Analyse du moment vertical T_z

Afin d'estimer la composante asymétrique de l'élévation du bras droit, nous avons calculé le moment vertical (cf. équation 4, page 83). Nous avons repris quelques mesures issues de l'expérience 2 (page 82). Nous nous sommes cependant limités aux variables représentant la première phase du moment vertical (phase positive).

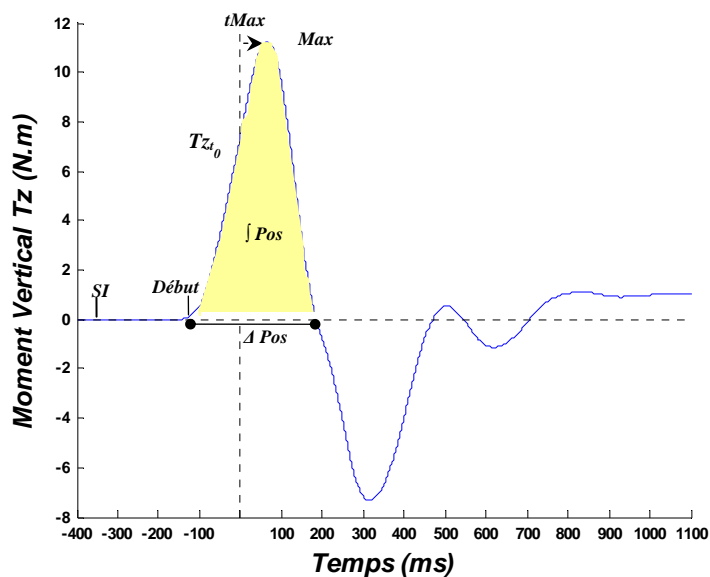


Figure VI-4 : Illustration des variables calculées sur le moment vertical.

Max et *tMax* représentent respectivement le moment et la valeur du pic maximal par rapport à t_0 . ΔPos représente la durée de la phase positive et son intégration représente son intensité ($\int Pos$). Afin de quantifier les APAs nous avons mesuré le début du moment Tz par rapport à t_0 (Tz_{t_0}).

2.6. Analyse statistique

L'analyse statistique s'est déroulée en deux parties. Les premières analyses concernent les variables permettant la comparaison entre les deux conditions posturales et le mouvement effectué (TR, accélération du bras et temps d'accélération du bras). La deuxième partie concerne les variables sur l'exécution du bras et son influence sur la posture en fonction de la préparation (préparation *Valide* vs. *Non-Valide*). Les données issues de la plate-forme de force et de l'activité des muscles posturaux ont été enregistrées uniquement lors de la condition posturale *Debout*. Le détail du plan de l'analyse de variance est donné pour chaque résultat. Une comparaison planifiée a été effectuée lorsque cela s'avérait nécessaire. La relation entre différentes variables a été analysée grâce à une régression linéaire. Le niveau de significativité a été fixé à $p < .05$.

3. RESULTATS

3.1. Effets de l'âge et de la durée de la PP sur la coordination entre la posture et le mouvement

3.1.1. Temps de réaction

Une analyse de variance comprenant 5 facteurs a été utilisée afin de montrer l'évolution du TR en fonction de ces paramètres (âge, durée de la PP, condition posturale, condition de préparation et mouvement exécuté). Les hypothèses principales étaient 1) de montrer une augmentation du TR dû à une programmation des APAs, et 2) de montrer un déficit de préparation lié à l'âge en fonction de la durée de la PP.

Les résultats issus de cette analyse montrent une interaction significative entre la condition de préparation et le type de mouvement [$F_{(1,14)}=15.1$, $p < .005$]. Les comparaisons planifiées montrent une augmentation du TR de la préparation *Valide* à la préparation *Non-Valide* uniquement lors de l'élevation de bras (339.4 ± 58.8 ms vs. 447.4 ± 119.4 ms, respectivement). Le TR associé au mouvement permettant de décoller la main du bouton-

poussoir ne semble pas évoluer en fonction de la condition de préparation (355.7 ± 77.7 ms vs. 371.6 ± 66.6 ms).

De plus, nous observons une quadruple interaction entre la durée de la PP, la condition posturale, la condition de préparation et l'âge [$F_{(3,42)}=5$, $p<.01$]. Le TR ne semble pas être influencé dans la condition *Non-Valide* en fonction des variables âge, condition posturale et durée de la PP. Cependant, les comparaisons planifiées montrent un effet significatif dans la condition de préparation *Valide* (Figure VI-5):

- Dans la condition *Assis*, une augmentation du TR des jeunes adultes est constatée de la PP₃₀₀ à la PP₅₀₀, alors que le TR des séniors augmente de la PP₃₀₀ à la PP₅₀₀ et de la PP₅₀₀ à la PP₇₀₀ ($p<.05$).
- Dans la condition *Debout*, le TR des jeunes adultes n'est pas modifié en fonction de la PP alors que celui des séniors augmente de la PP₇₀₀ à la PP₉₀₀ ($p<.05$).

D'un point de vue général, le TR augmente en fonction de la durée de la PP uniquement lors d'une préparation Valide. Le TR n'est pas modifié en fonction de l'âge. Cependant, les séniors semblent plus perturbés que les jeunes adultes par l'augmentation de la durée de la PP dans la condition Assis et Debout malgré un effet de la durée de la PP plus atténué lors de cette dernière.

L'augmentation du TR en fonction de la production des APAs n'est pas constatée.

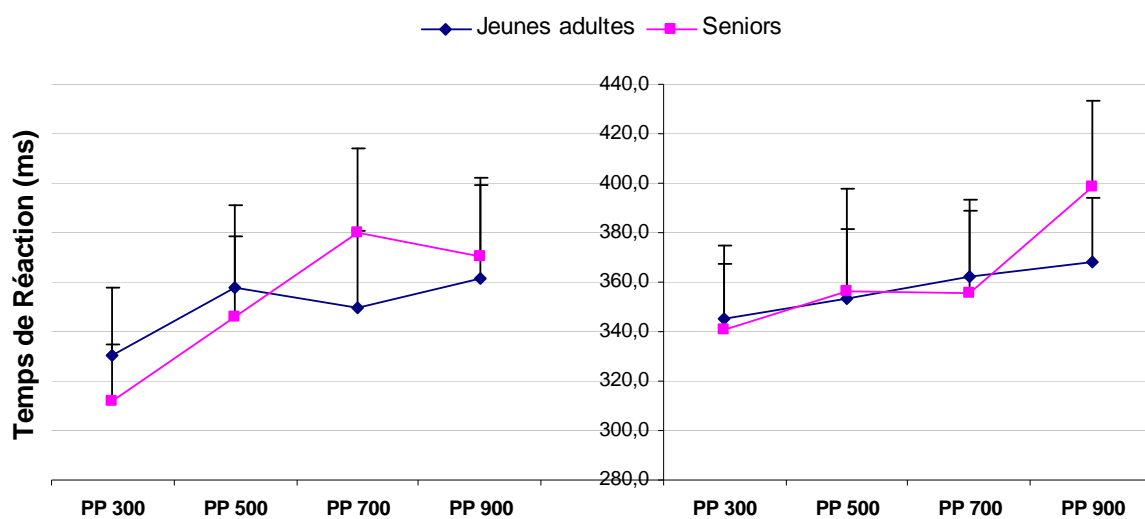


Figure VI-5 : Effet de la PP sur le TR en fonction de l'âge et de la condition posturale lors d'une préparation *Valide*.

3.1.2. Accélération du Bras

Une analyse de variance (âge × condition posturale × condition de préparation × durée de la PP) a été effectuée sur le pic d'accélération du bras lors de l'élévation de celui-ci. Les résultats montrent un effet simple de l'âge [$F_{(1,14)}=6.5$, $p<.05$]. Les séniors ont un pic d'accélération inférieur aux jeunes adultes (25 m/s² vs. 14.6 m/s², respectivement). De plus nous observons un effet simple de la condition posturale [$F_{(1,14)}=4.6$, $p<.05$]. L'accélération du bras est moins importante dans la condition *Assis* par rapport à la condition *Debout* (19.3 m/s² vs. 21.1 m/s², respectivement).

Une analyse de variance identique a été effectuée sur le temps pour atteindre ce pic d'accélération. Ce temps est plus important lors de la condition *Assis* par rapport à la condition *Debout* [254 vs. 236 ms, respectivement, $F_{(1,14)}=6.4$, $p<.05$]). Cependant, nous observons une interaction âge × durée de la PP [$F_{(3,42)}=3.8$, $p<.05$]. Les comparaisons panifiées montrent un temps d'accélération plus important chez les séniors quelle que soit la durée de la PP ($p<.05$). Cependant, le temps d'accélération des séniors lors de la PP₃₀₀ est inférieur aux autres durées de la PP ($p<.01$). Aucune variation du temps d'accélération n'est observée chez les jeunes adultes.

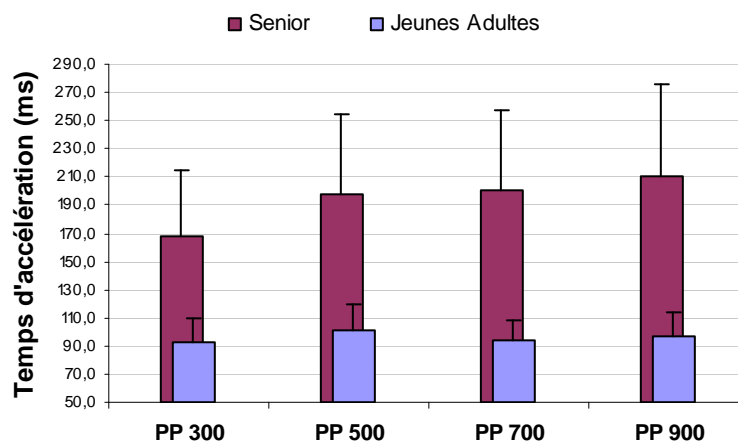


Figure VI-6 : Interaction âge × durée de la PP sur le temps d'accélération de l'élévation du bras.

Les résultats montrent une vitesse d'exécution du mouvement d'élévation du bras moins rapide dans la position assise.

Les séniors lèvent le bras moins rapidement que les jeunes adultes et semblent être affectés par la durée de la PP. En effet, lorsque la durée de la PP est la plus longue (PP₉₀₀), la vitesse du mouvement est la plus faible.

3.1.3. APAs et stabilité posturale

L'enregistrement des variables posturales a été effectué uniquement dans la position *Debout*. De plus, l'utilisation d'un léger mouvement du bras afin de décoller la main du bouton-poussoir ne permet pas d'observer des modifications sur ces variables. Par conséquent, une analyse de variance à trois facteurs (âge × condition de préparation × durée de la PP) a été utilisée sur chaque variable posturale.

3.1.3.1. Données électromyographiques

Les résultats de cette anova sur le temps de latence entre le début d'activation du muscle ES et t_0 montrent une interaction entre l'âge et la condition de préparation [$F_{(1,10)}=5.7$, $p<.05$]. Noter une diminution des degrés de liberté dans l'analyse due à une absence d'activation du muscle ES chez certains sujets. La latence des APAs du muscle ES n'est pas différente entre les deux populations. Cependant, l'anticipation lors de la condition de préparation *Non-Valide* semble moins importante par rapport à la préparation *Valide* chez les séniors (-88.6 ms vs. -97.8 ms, respectivement, $p=.06$). L'anticipation du muscle ES par rapport à t_0 n'est pas influencée par la condition de préparation chez les jeunes adultes (environ -90 ms).

Concernant le muscle BF ipsilatéral, seul un effet simple de la condition de préparation est présent [$F_{(1,12)}=10.8$, $p<.01$]. On observe une plus grande anticipation du BF par rapport à t_0 dans la condition de préparation *Valide* par rapport à la condition de préparation *Non-Valide* (-109.9 ms vs. -97.7 ms, respectivement). Aucun effet n'est observé sur le Sol et le TA ipsilatéraux.

Les résultats montrent une diminution de l'anticipation du muscle ES et BF lors de la condition de préparation Non-Valide indépendamment de l'âge.

3.1.3.2. Déplacement du CP

L'effet des APAs sur le déplacement antéro-postérieur du CP a été analysé grâce à la variable ΔCP_{t_0} . L'anova montre un effet simple de l'âge [$F_{(1,14)}=5.5$, $p<.01$]. ΔCP_{t_0} est moins important chez les personnes âgées que chez les jeunes adultes (-1.8 mm vs. -3.6 mm, respectivement).

Aucun effet n'est observé sur la variable $tMinCP_y$, temps séparant t_0 du pic maximal arrière du CP. Cependant, l'ANOVA réalisée sur ce pic ($\Delta MinCP_y$) montre une interaction entre l'âge et la durée de la PP [$F_{(3,42)}=3.1$, $p<.05$]. Le déplacement maximal arrière du CP ne varie pas en fonction de la durée de la PP chez les jeunes adultes. Par contre, une comparaison planifiée montre que ce déplacement diminue de la PP₃₀₀ à la PP₉₀₀ chez les séniors ($p<.001$). La différence d'âge est significative à partir de la PP₅₀₀ ($ps<.05$).

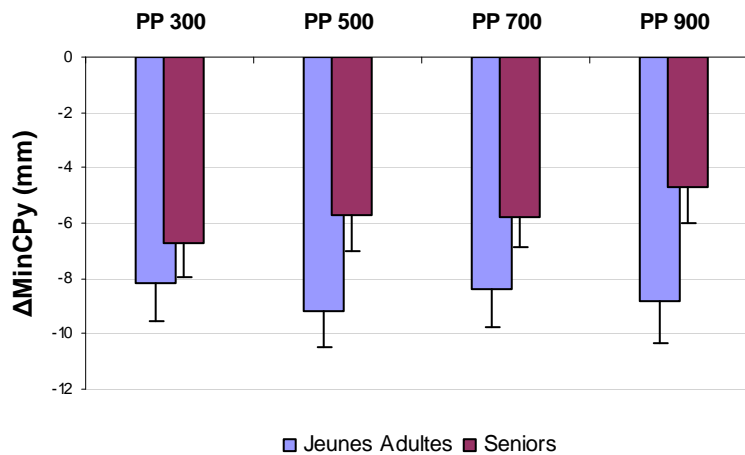


Figure VI-7 : Interaction âge × durée de la PP sur le déplacement maximal arrière du CP lors d'une élévation d'un bras dans la condition *Debout*.

Enfin, le déplacement maximal du CP vers l'avant ($\Delta MaxCP_y$) est moins important chez les séniors (14.3 mm vs. 19 mm, [$F_{(1,14)}=4.8$, $p<.05$]). De plus, l'anova révèle un effet simple de la condition de préparation [$F_{(1,14)}=4.7$, $p<.05$]. Le déplacement maximal est plus important lors de la préparation *Non-Valide* que *Valide* (17.5 mm vs. 15.8 mm, respectivement).

Ces résultats suggèrent une plus grande stabilité dans le plan antéro-postérieure des séniors. Cependant, ce résultat est à mettre en rapport avec une vitesse du mouvement focal moins importante. Nous avons donc analysé deux rapports :

- L'ANOVA basée sur le rapport entre l'amplitude totale du déplacement du CP et l'accélération maximale du bras montre une interaction entre l'âge et la durée de la PP [$F_{(3,42)}=3.4$, $p<.05$]. Les comparaisons planifiées montrent que ce rapport n'est pas différent entre les deux populations. Rapportées à une accélération identique, les deux populations ont un degré de stabilité antéro-postérieure identique. Cependant, nous observons une diminution significative de ce rapport chez les séniors entre la PP₃₀₀ et

la PP_{900} , ce qui suggère une perturbation posturale moins importante pour une accélération du bras identique.

- L'ANOVA basée sur le rapport entre les temps pour atteindre le pic maximal d'accélération du bras et le pic minimal du déplacement du CP (t_{MinCP_y}) montre deux effets simples de l'âge et de la condition de préparation ($[F_{(1,14)}=6.1, p<.05]$ et $[F_{(1,14)}=6.9, p<.05]$, respectivement). Ce rapport augmente chez les personnes âgées suggérant une dégradation dans le temps de la coordination posture/mouvement ($.81 \pm .43$ vs. $.43 \pm .18$, respectivement). Puisque nous avons observé que le temps pour atteindre le pic minimal du déplacement du CP n'évolue pas en fonction de l'âge, la dégradation de l'efficacité de la coordination posture/mouvement proviendrait alors d'une dégradation plus importante de la commande focale par rapport à la commande posturale. De même, malgré l'absence d'un effet de la préparation sur les deux temps utilisés pour calculer ce rapport, ce dernier augmente d'une préparation *Valide* à une préparation *Non-valide* ($.53 \pm .32$ vs. $.63 \pm .38$, respectivement). Ce résultat suggère donc une dégradation dans le temps de la coordination posture/mouvement lors de la préparation *Non-valide*.

Les personnes âgées montrent une sensibilité particulière à la durée de la PP. Le temps pour atteindre le pic d'accélération du bras est plus important dans la condition PP_{900} , ce qui peut expliquer la diminution du déplacement maximal arrière du CP lors de cette durée.

L'effet des APAs est moins marqué en condition de préparation Non-Valide par rapport à la préparation Valide. Il s'ensuit une augmentation de l'instabilité antéro-postérieure au regard du déplacement maximal du CP vers l'avant.

3.1.3.3. Moment vertical

L'analyse de la composante asymétrique de la perturbation posturale (moment vertical T_z) montre un effet de la condition de préparation sur les APAs. Un effet simple a été observé sur le temps séparant le début de variation de T_z par rapport à t_0 $[F_{(1,14)}=15, p<.005]$. Le moment T_z est plus anticipé dans la condition de préparation *Valide* (-110 ms vs. -97.6 ms). On observe un effet similaire sur la valeur du moment générée à t_0 ($T_{z_{t_0}}$) $[F_{(1,14)}=15, p<.005]$.

La préparation *Valide* permet un effet des APAs sur le moment plus important par rapport à la préparation *Non-Valide* (4.6 N.m vs. 3.5 N.m, respectivement).

L'analyse du pic maximal (*Max*) montre une interaction entre l'âge et la condition de préparation [$F_{(1,14)}=5.1$, $p<.05$]. Les jeunes adultes développent un pic maximal moins important en condition de préparation *Non-Valide* (5.5 vs. 8.6 N.m, respectivement). Les séniors ont un pic inférieur aux jeunes adultes uniquement dans la condition de préparation *Valide* (7.1 vs. 8.5 N.m, respectivement) et n'est pas modifié en fonction de la condition de préparation. De plus, le temps pour atteindre ce pic maximal (*tMax*) par rapport à t_0 est uniquement influencé par la condition de la préparation [$F_{(1,14)}=18.5$, $p<.001$]. L'apparition du pic est plus rapide dans la condition de préparation *Valide* comparativement à la préparation *Non-valide* (92 vs. 119 ms, respectivement).

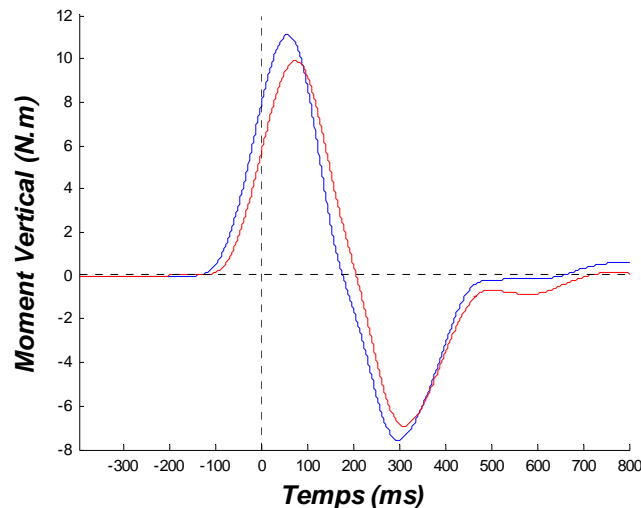


Figure VI-8 : Illustration du moment vertical en fonction de la condition de préparation.

Cette illustration représente le moment vertical d'un sujet représentatif pour une PP donnée. Les courbes représentent une moyenne de 12 essais et de 3 essais en condition de préparation *Valide* (courbe bleue) vs. *Non-Valide* (courbe rouge). La préparation *Valide* a pour conséquence un moment vertical « plus dynamique » avec une anticipation et un pic plus importants, ainsi qu'une phase positive moins longue.

Enfin, l'analyse de la durée de la phase positive (*APos*) montre deux effets simples. Le premier concerne l'âge [$F_{(1,14)}=13.2$, $p<.005$]. Cette phase est plus courte chez les jeunes adultes par rapport aux séniors (328 vs. 416 ms, respectivement). Le deuxième effet simple montre une valeur moins importante de *APos* en condition de préparation *Valide* par rapport à la préparation *Non-valide* (351 vs. 393 ms, respectivement [$F_{(1,14)}=41.2$, $p<.001$]). L'intensité de ce moment mise en évidence par l'intégration de cette phase positive (*JPos*) montre un

effet similaire [$F_{(1,14)}=13$, $p<.005$]. L'intensité est moins importante lors de la préparation *Non-Valide* par rapport à la préparation *Valide* (1303 vs. 1403 N.mm.s, respectivement).

Ces résultats montrent une diminution de l'effet des APAs sur le moment vertical (Tz_{t_0}) avec une diminution du pic maximal (**Max**) en condition de préparation *Valide* par rapport à une préparation *Non-Valide*. Afin de connaître l'importance des APAs sur ce pic maximal, nous avons calculé le pourcentage que représente Tz_{t_0} par rapport à la variable **Max**. L'ANOVA montre un effet simple de la condition de préparation [$F_{(1,14)}=24.2$, $p<.001$]. L'effet des APAs sur le moment vertical représente 65.7 % du pic maximal dans la condition de préparation *Valide* contre 56.5% dans la condition de préparation *Non-Valide*.

Aucune différence d'âge n'est observée sur le moment vertical exceptée la diminution du pic maximal et de la durée de la phase positive chez les seniors relative à une vitesse d'exécution du mouvement focal moins importante que celle des jeunes adultes.

Lors de la préparation Non-Valide, nous retrouvons une diminution des APAs sur le moment vertical conduisant à un phénomène moins dynamique (diminution du pic maximal et augmentation de la phase positive).

4. DISCUSSION

Un des objectifs principaux de cette étude était de montrer une augmentation du TR associé à la production d'APAs. Afin de valider cette hypothèse, nous aurions dû observer une augmentation du TR en fonction du type de mouvement, c'est-à-dire, un TR qui augmente lors de l'élévation du bras par rapport au faible mouvement du bras permettant de décoller la main du bouton-poussoir. Les résultats présentés montrent un TR identique en fonction du type de mouvement uniquement en condition de préparation *Valide*. Lorsqu'il faut décoller la main du bouton-poussoir, l'absence d'une augmentation du TR en condition de préparation *Non-Valide* suggère que les sujets ne se préparent pas à effectuer ce type de mouvement.

Le deuxième objectif de cette étude était d'analyser l'optimum de préparation en fonction du déficit de préparation relatif à l'âge. Le premier résultat met en évidence une stratégie de préparation différente avec l'apparition d'une augmentation du TR en fonction de la PP à défaut d'un optimum de préparation de 500 ms en condition *Assis*. Cette différence pourrait s'expliquer par une diminution de l'incertitude événementielle de la tâche par rapport

à la première expérience. En effet, malgré la présence de deux possibilités de mouvements dans un bloc d'essais, la tâche s'apparenterait à une procédure de TRS. Dans chaque bloc d'essais, le SP présenté était tout le temps identique et présentait dans 80% des cas le mouvement à effectuer. Dans ces conditions, le sujet pouvait tout à fait préparer sa réponse avant le SP. L'incertitude événementielle était donc quasi nulle durant la PP. Cependant, bien que la relation PP-TR soit différente de celle attendue, nous observons certaines différences liées à l'âge en fonction de la durée de la PP et de la condition posturale.

4.1. Effets de l'âge et de la PP lors de la préparation *Valide*

Les résultats issus de l'analyse du TR montre une augmentation du TR en fonction de la PP en condition *Assis*, quel que soit le type de mouvement demandé (décoller la main ou élever le bras). Cette augmentation semble importante et est significativement de la PP₃₀₀ à la PP₅₀₀ et de la PP₅₀₀ à la PP₇₀₀ chez les personnes âgées. Chez les jeunes adultes, le TR n'augmente que de la PP₃₀₀ à la PP₅₀₀. Le TR augmente plus rapidement chez les personnes âgées à mesure que la durée de la PP s'allonge. Elles ont ainsi plus de difficulté à synchroniser leur préparation par rapport au moment d'apparition du SI. Ce résultat confirme celui de Gottsdanker (1982) suggérant que les personnes âgées ont des difficultés à maintenir une préparation sur un intervalle de temps croissant. Ainsi, le processus d'estimation temporelle du moment d'apparition du SI se dégraderait avec l'âge.

Lorsque les personnes âgées sont placées dans une situation où il faut sélectionner une réponse parmi deux ou plusieurs possibles, leurs performances sont considérablement affectées (Larish & Stelmach, 1982 ; Stelmach et al., 1987, 1988, 1990). Bien que notre méthodologie soit basée sur une tâche de TRC, certaines conditions sont réunies pour maximiser la préparation motrice durant la PP. En effet, deux blocs d'essais différents ont été utilisés en fonction du mouvement à produire ce qui atténuait les processus de sélection de la réponse durant la PP. De plus, le choix porté sur le type de mouvement était biaisé par un indice de probabilité important (80/20) ce qui réduisait considérablement l'incertitude événementielle liée à la tâche. Ce phénomène pourrait ainsi expliquer l'absence d'une augmentation du TR en fonction de l'âge. Ainsi, lorsqu'il existe une opportunité de préparer la réponse durant la PP, il apparaît que les personnes âgées sont capables de produire une réponse aussi rapidement que les jeunes adultes.

La durée de la PP semble influencer de manière plus importante la programmation du mouvement des personnes âgées. En effet, nous observons une augmentation du temps pour

atteindre le pic d'accélération du bras chez les séniors en fonction de la durée de la PP. Ce résultat suggère une vitesse du mouvement inférieure dans la condition de PP₉₀₀ ms alors que les jeunes adultes ont un temps d'accélération du bras identique. Mattes & Ulrich (1997) ont démontré un effet moteur de la PP en s'intéressant à l'évolution du TR et de la force produite en fonction de la durée de la PP lors d'une tâche de presse-bouton. Ils ont observé une augmentation du TR et de la force produite en fonction de l'augmentation de la durée de la PP (Sander, 1990). Cependant, nos travaux montrent une évolution différente de cet effet moteur. Les séniors montrent une augmentation du TR avec une diminution de la vitesse du mouvement. Cette inversion de la relation production de force-vitesse/TR par rapport à une population contrôle a été retrouvée chez les Parkinsoniens (Franz & Miller, 2002). Cet effet au niveau de la commande focale se retrouve au niveau postural puisque nous avons montré une diminution du déplacement maximal arrière du CP lors de la PP₉₀₀. Ce résultat peut provenir de deux phénomènes, un effet mécanique provenant de la vitesse du mouvement focal (Lee, 1987 ; Mochizuki et al., 2004) ou alors une influence de l'effet de la PP sur le déplacement du CP. La première hypothèse semble plus probable dans la mesure où aucun effet de la PP n'a été observé sur les variables EMGs. Cependant, Les résultats issus du rapport entre les temps pour atteindre le pic d'accélération du bras et le pic maximal arrière du CP montrent une désynchronisation de la coordination posture/mouvement en fonction de l'âge. Le temps d'accélération du bras représente une part plus importante du temps pour atteindre le pic maximal arrière du CP en fonction de l'âge. Ce résultat suggèrent que la commande focale serait dégradée de manière plus importante que la commande posturale avec l'âge.

4.1.1. Evolution du TR en fonction de la condition posturale

Les chapitres précédents ont permis de montrer une interaction entre la durée de la PP et la condition posturale. L'optimum de préparation, i.e., temps prémoteur et/ou TR le plus court, correspond à une PP de 500 ms en position *Assis* et de 700 ms en position *Debout*. Cette étude montre des résultats différents. Un effet de la PP est uniquement présent lors de la condition *Assis*, aucune augmentation significative du TR n'est observée en condition *Debout* mise à part entre la PP₇₀₀ et la PP₉₀₀ chez les personnes âgées. Le sujet utiliserait donc une stratégie de préparation uniquement en condition *Assis*. Au regard de la littérature sur l'effet de la PP, l'augmentation du TR en fonction de la durée de la PP reflèterait une stratégie consistant à estimer le moment d'apparition du SI. Lorsque la durée de la PP devient de plus

en plus longue, cette estimation du temps s'écoulant depuis le SP serait moins précise, entraînant une augmentation du TR (Klemmer 1956 ; Drazin, 1961 ; Mattes & Ulrich, 1997 ; Correa et al., 2006). Cette stratégie refléterait alors un phénomène passif selon Woodrow (1914).

En condition *Debout*, aucun effet significatif de la PP n'est observé suggérant soit une capacité à maintenir une préparation optimale indépendamment de la durée de la PP, soit une absence d'un gain de TR relatif à la diminution de l'incertitude temporelle grâce à l'utilisation de la durée de la PP. Malgré l'absence d'un optimum de préparation à 700 ms observé dans cette étude, absence probablement due à la modification du protocole d'expérimentation, nous retrouvons bien une interaction entre la condition posturale et la durée de la PP. Ce résultat confirmerait l'impact de la durée de la PP sur l'étape des ajustements moteurs au niveau de la chaîne de traitement de l'information. La complexité posturale influencerait donc cette étape.

4.2. Préparation posture/mouvement et reprogrammation du mouvement

Lors d'une reprogrammation du mouvement de presse-bouton en une élévation du bras, le TR augmente suggérant un temps additionnel nécessaire à la déprogrammation du mouvement préparé durant la PP (relâcher le bouton) et la reprogrammation du mouvement requis (élévation du bras). Il est, par ailleurs, intéressant de constater une absence d'effet de la durée de la PP lors de cette reprogrammation. En effet, l'interaction entre la condition de préparation et la durée de la PP ne montre aucune variation du TR en fonction de la PP dans la condition *Non-Valide* confirmant ainsi une inutilité de la préparation et du temps de préparation lors d'une reprogrammation du mouvement. Cependant, cette reprogrammation n'affecte pas la vitesse du mouvement puisque le pic d'accélération du bras ainsi que le temps pour atteindre ce pic ne semblent pas différents en fonction de la condition de préparation. Ce résultat exclut donc l'interprétation d'une modification des APAs en fonction de la vitesse du mouvement.

La préparation *Non-Valide* influencerait le degré de stabilité du sujet dans le plan antéro-postérieur puisque nous observons une augmentation du déplacement du CP par rapport à la condition de préparation *Valide*. Cette instabilité est associée à une diminution des APAs présents au niveau des muscles Erector Spinae et Biceps Femoris. Un effet de la reprogrammation du mouvement est présent sur la composante asymétrique de la perturbation posturale. Les résultats montrent une anticipation moins importante du moment vertical lors de la condition *Non-Valide*. Cette baisse d'anticipation s'accompagne d'un effet des APAs

réduit sur le pic maximal malgré une diminution de ce pic. De plus, nous observons une augmentation du temps pour atteindre le pic maximal ainsi qu'une phase positive plus importante. Il s'ensuit une intensité de la phase positive moins importante. Il existe donc une modification de la compensation de la perturbation posturale en fonction de la condition de préparation malgré une vitesse d'élévation du bras identique. Brown & Frank (1987) se sont intéressés à cette méthode de priming lors d'une tâche posturo-cinétique. L'objectif était de pousser ou tirer un levier en fonction d'une préparation valide (80%) neutre (50%) et non valide (20%). Leurs résultats ont montré un laps de temps entre le SI et le début du déplacement du CP identique entre la condition neutre et non-valide avec une augmentation du TR associé à la condition non-valide. Ils interprétaient ce résultat comme une inhibition de la commande posturale sur la commande focale suggérant ainsi un mode de contrôle parallèle entre les deux commandes. Les résultats de notre étude ne contredisent pas ce mode de contrôle en parallèle. Cependant, nous observons des résultats différents. L'augmentation du temps pré-moteur est associée à une diminution des APAs observée sur la latence musculaire de l'ES, du BF et du début de variation du moment vertical. Ces résultats suggèrent fortement un laps de temps entre le SI et le début de la commande posturale plus important dans la condition de préparation *Non-valide* par rapport à la préparation *Valide*.

Différents travaux étudiant la relation entre TR et APAs ont montré une diminution des APAs lorsque le TR était court (Slijper et al., 2002). De même, des corrélations plus ou moins importantes ont été obtenues entre le TR et la latence des APAs suggérant que les APAs seraient programmés en fonction du temps imparti par le TR. Cette présente étude montre que ces APAs sont dépendant d'une préparation effective du mouvement. Le SNC serait capable d'utiliser une information spécifique présentée durant la PP afin de préparer des APAs importants et de réagir le plus rapidement possible. Lorsque cette préparation est erronée (reprogrammation du mouvement), nous observons une augmentation du TR associée à une diminution des APAs. Malgré une synergie musculaire posturale identique, nous observons en effet une réorganisation dans le temps et dans l'intensité de la commande posturale lors d'une reprogrammation du mouvement focal. Ce résultat infirme donc l'hypothèse d'une programmation des APAs basée uniquement sur le temps imparti par le TR suggérant ainsi l'utilisation de la PP afin de préparer cette commande posturale anticipée.

En conclusion, cette étude montre un effet de l'âge sur la coordination posture/mouvement avec une efficacité de la commande focale détériorée par rapport à la commande posturale. De plus, l'effet de la durée de la PP semble plus important chez les

personnes âgées. Les processus de préparation temporelle semblent être plus affectés avec l'âge. Il s'ajoute un effet de la durée de la PP sur la vitesse du mouvement se répercutant sur la stabilité posturale en condition *Debout*. La stratégie de préparation serait dépendante de la condition posturale avec 1) une stratégie d'estimation du moment d'apparition du SI en position *Assis*, et 2) une atténuation de cette stratégie lorsque la complexité posturale augmente (position *Debout*). Enfin, lors d'une reprogrammation du mouvement, la commande focale ainsi que la commande posturale semble se dégrader avec une augmentation du TR et une diminution des APAs suggérant une utilisation efficace de la PP pour préparer la commande posturale.

CHAPITRE VII: DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail a concerné l'étude des processus de préparation posturale dans les mécanismes anticipateurs liés à la réalisation d'un mouvement volontaire du membre supérieur. Nous avons manipulé le temps de cette préparation (durée de la PP) en fonction de l'incertitude temporelle et/ou événementielle du mouvement focal ou de la perturbation posturale associée. Notre but était de déterminer comment s'effectue la préparation d'une tâche posturo-cinétique lorsque le système doit coordonner la posture et le mouvement. Existe-t-il une préparation spécifique de la commande posturale par rapport à la commande focale ? Face à cette préparation, comment s'organisent la commande posturale et la commande focale lors d'une tâche nécessitant une coordination entre les deux ?

Afin de répondre à ces questions, nous avons réalisé quatre études que nous avons présentées dans les différents chapitres expérimentaux de ce document, mais dont nous allons brièvement rappeler les points qui nous semblent essentiels nous permettant de répondre aux différentes questions posées.

La première expérimentation a mise en évidence un optimum de préparation différent en fonction de la condition posturale lors d'une préparation sélective, c'est à dire lorsqu'une information était présentée au sujet pendant le SP. Les résultats ont montré qu'il existerait un temps de préparation additionnel pour un mouvement exécuté dans une posture bipédique. Nous avons fait l'hypothèse que ce temps additionnel correspondait 1) à la préparation des APAs durant la PP, ou 2) à un effet global de la complexité posturale. En relation avec cet optimum de préparation, les APAs sembleraient moins anticipés avec une réponse posturale retardée dans le temps. Afin de répondre à notre hypothèse, nous avons réalisé la deuxième étude avec la même tâche 1) lors d'une préparation neutre, c'est à dire sans possibilité de préparer un mouvement durant la PP, et 2) en comparant cette fois-ci les deux postures grâce aux informations issues de l'électromyographie et de la plate-forme de force. La préparation neutre ne permettant pas de préprogrammer les APAs durant la PP, la conservation de l'augmentation de l'optimum de préparation à 700 ms permettait d'affirmer qu'elle provient d'un effet de la complexité générale de la posture. Les résultats ont montré une activité posturale plus synchronisée par rapport à l'initiation de la réponse focale en condition *Assis*. En condition bipédique, les APAs sont plus importants malgré une instabilité posturale supérieure par rapport à la condition *Assis*. Bien que l'utilisation d'une préparation neutre ne puisse pas permettre au sujet de préprogrammer certains paramètres de la tâche, nous

retrouvons cette stratégie consistant à retarder la commande posturale lors de l'optimum de préparation. Cependant, l'absence d'une modification de l'optimum de préparation en fonction de la nature de la préparation (neutre vs. sélective) ne peut pas pour autant exclure la possibilité d'une préparation des APAs durant la PP. Nous avons donc analysé les différences entre ces deux types de préparation en fonction de la durée de la PP lorsque cette fois-ci l'information présentée renseignait exclusivement sur la perturbation posturale et non sur le mouvement focal. Une tâche de délestage a été privilégiée puisqu'un même mouvement focal (relâcher un bouton-poussoir) pouvait induire ou non une perturbation posturale. Nous avons démontré une amélioration de la commande focale (diminution du temps pré-moteur) associée à une amélioration de la stabilité posturale grâce à la préparation sélective. Ces résultats montrent qu'une information pertinente sur la perturbation posturale peut être prise en compte par le SNC afin d'utiliser la PP pour préparer une synergie posturale minimisant la perturbation posturale. Cependant, cette synergie est moins efficace lors de la PP optimale quelle que soit la nature de la préparation suggérant une interférence entre la rapidité de réaction du sujet et la conservation de la stabilité posturale. L'hypothèse d'une utilisation d'information durant la PP par le SNC afin de prévoir une synergie posturale est renforcée par le fait qu'une commande posturale anticipée persiste même lorsque la perturbation posturale n'apparaît pas. Si cette hypothèse s'avère exacte, nous avons proposé que lorsqu'une reprogrammation du mouvement est nécessaire (c'est-à-dire, lors d'une préparation *Non-valide*), nous devrions observer une diminution des APAs par rapport à une préparation *Valide*. Cette hypothèse a été testée et validée durant la dernière expérience sur deux populations d'âge différent (20 et 70 ans). Enfin, les résultats de cette étude ont montré, par ailleurs, peu de différence dans la coordination posture/mouvement en fonction de l'âge. Les personnes âgées ont exécuté le mouvement plus lentement que les jeunes adultes avec un déplacement des pressions moins important. Cependant, elles semblent présenter une sensibilité plus importante à la durée de la PP sur les processus moteurs puisque nous observons une diminution de la vitesse du mouvement en fonction de la durée de la PP associée à une diminution du déplacement du CP. Cet effet est absent chez les jeunes adultes.

Cette discussion générale va donc s'articuler autour de trois points :

- Dans un premier temps, nous allons démontrer grâce aux trois premières études que la stratégie de préparation est dépendante de la contrainte posturale, cette relation étant influencée par l'incertitude de la tâche.

- Dans un second temps nous montrerons que la commande posturale anticipée peut être dépendante des processus situés en dérivation par rapport à la chaîne de traitement de l'information. Nous montrerons ainsi que les APAs peuvent être préprogrammés durant la période préparatoire.
- Enfin, nous tenterons de formuler une explication concernant le fonctionnement de la coordination posture/mouvement au regard des effets de l'incertitude événementielle et de la contrainte temporelle de la préparation.

1. OPTIMUM DE PREPARATION, CONTRAINTE POSTURALE ET INCERTITUDE

1.1. Contrainte posturale liée à l'exécution du mouvement

L'expérience 2 nous montre que l'élévation d'un bras en condition *Assis* est accompagnée d'une activité posturale concomitante voire légèrement anticipée. Ce mouvement apparaît comme étant moins rapide par rapport à une condition *Debout*. Les expériences 1, 2 et 4 montrent cette diminution de la vitesse d'exécution bien que les deux premières expérimentations n'atteignent pas la valeur statistique significative. Ce résultat est confirmé par les études portant sur la production d'APAs dans cette configuration posturale (Goutal, 1994 ; Van der Fits et al., 1998). Cette diminution de la vitesse de production du mouvement semble avoir pour origine une diminution des degrés de liberté du corps par rapport à la condition *Debout*. Léonard de Vinci disait déjà en son temps que « *le bras qui aura le mouvement le plus ample et la plus grande puissance sera celui qui, s'écartant de sa position naturelle, sera le plus puissamment aidé par les autres membres pour le porter à l'endroit ou il veut se mettre* » (cité par Gahéry, 1987). Selon cette idée, la posture servirait non seulement de support au mouvement mais permettrait d'optimiser ce dernier. Les APAs observés en condition *Assis* auraient alors pour rôle cette fonction d'optimisation. En effet, les travaux de Le Bozec et al. (1997, 2001 et 2004) ont montré une augmentation de la production d'APAs associée à une augmentation de la force produite par les bras lors d'une action sur une barre dynamométrique. La production de cette force serait dépendante de la surface de contact des cuisses sur la chaise (100% vs. 30% de la longueur des cuisses en contact avec la chaise) puisqu'une augmentation de la mobilité du pelvis par une diminution de cette surface de contact entraîne une augmentation de la force produite. Le même phénomène est observé sur la vitesse d'élévation d'un bras en vue d'un pointage. Lino et al. (1992) ainsi que Teyssède et al. (2000) ont observé une augmentation des APAs ainsi que de

la vitesse du mouvement lorsque la mobilité du pelvis est accrue (condition de contact de 30%). La faible présence des APAs dans l'expérimentation 2 en condition *Assis* refléterait alors ce rôle d'aide au mouvement par rapport à la condition *Debout* où les APAs sont connus pour minimiser la perturbation posturale.

Ce rôle différent des APAs en fonction de la condition posturale (*Assis* vs. *Debout*) s'accompagne d'une synergie posturale différente. Nous avons observé une inversion de l'activation des Tenseurs du Fascia Latae ipsilatéral et controlatéral par rapport à la condition bipédique. Une légère activation anticipée du TFL ipsilatéral est observée en condition *Assis* par rapport à la condition *Debout*. Les résultats de l'expérience 2 sur la latence et l'intensité de ces APAs nous montrent que la commande posturale anticipée est plus importante en condition *Debout* malgré une instabilité plus importante au regard du déplacement du CP.

1.2. Optimum de préparation et contrainte posturale

La coordination entre la posture et le mouvement en position bipédique semble donc plus complexe dans la mesure où la commande posturale anticipée est plus importante et a pour fonction de minimiser la perturbation posturale créée par le mouvement focal. Cela implique donc un calibrage relativement fin entre la commande posturale et la commande focale. Ce calibrage serait bien moins nécessaire en condition *Assis* puisque la stabilité posturale est plus élevée. En effet, pour une perturbation identique dans les deux conditions posturales, le SNC dispose d'une plus grande marge de manœuvre pour réguler le déplacement du CG en condition *Assis* puisque la base de sustentation est plus importante. Le déplacement du CP peut donc être plus important pour réguler le déplacement du CG. Nous trouverions dans ce phénomène une explication à l'augmentation de l'optimum de préparation de 500 ms en condition *Assis* à 700 ms en condition *Debout*. Le SNC prendrait plus de temps de préparation pour calibrer la commande posturale lorsque la base de sustentation est réduite. Cette augmentation de la période préparatoire optimale serait donc fonction de la complexité globale de la tâche et non d'une préparation spécifique des APAs. Deux résultats permettent de soutenir cette hypothèse :

- Les résultats des deux premières expérimentations montrent que l'augmentation de la durée de la PP optimale en fonction de la condition posturale est indépendante de la nature de la préparation (neutre vs. sélective). Bien que la préparation sélective puisse permettre une sélection de la synergie posturale à adopter (Woollacott et al., 1984), nous retrouvons un optimum de préparation identique lorsque cette sélection est

impossible (préparation neutre). Dès lors, l'augmentation de l'optimum de préparation ne peut pas provenir de la préparation des APAs durant la PP.

- Nous retrouvons dans les deux premières expériences un optimum de préparation en condition *Assis* identique (500 ms) lors d'un mouvement d'élévation du bras impliquant une perturbation posturale et lors d'une tâche de presse-bouton (Posner et Boies, 1971 ; Adams et Lambos, 1986 ; Mattes et Ulrich, 1997 ; Hasbroucq et al., 1997). La conservation de l'optimum de préparation à 500 ms malgré la faible présence des APAs en condition *Assis* démontre bien que les APAs ne sont pas responsables de l'augmentation de l'optimum de préparation en fonction de la condition posturale.

Enfin, une dernière hypothèse concernant l'explication de cette modification de l'optimum de préparation en fonction de la condition posturale peut provenir de la vitesse d'exécution du mouvement focal. En effet, la condition posturale *Assis* est connue pour diminuer la vitesse du mouvement d'élévation d'un bras par rapport à la condition posturale debout (Van der Fits et al., 1998 ; Teyssedre et al., 2000). Nous retrouvons ce résultat dans notre quatrième expérimentation. Néanmoins, au regard de nos résultats que nous avons obtenus dans l'expérience 3, cette hypothèse est infirmée puisque nous retrouvons un optimum de préparation à 700 ms en condition *Debout* lors d'une tâche de délestage initiée par un mouvement de l'index droit.

1.3. Optimum de préparation et incertitude de la tâche

1.3.1. Incertitude temporelle

Nous venons de montrer que la relation entre le temps prémoteur et la durée de la PP est dépendante de la configuration posturale. Cependant, au regard de la littérature, cette relation est aussi dépendante du mode de présentation de la durée de la PP (présentation bloquée vs. aléatoire). Nous avons vu dans le cadre théorique que le mode de présentation bloquée provoquait une augmentation du TR en fonction de l'augmentation de la PP dans des tâches de presse-bouton (Klemmer, 1956 ; Niemi et Näätänen, 1981 ; Mattes et Ulrich, 1997). Cette relation serait inversée par l'utilisation de périodes préparatoires relativement courtes (Näätänen et al., 1974) et entraînerait une diminution du TR en fonction de la PP. Les données issues de la littérature montrent que la présentation aléatoire engendre la même évolution avec une diminution du TR en fonction de la PP (Woodrow, 1914 ; Bertelson et Tisseyre, 1968 ;

Bertelson et Tisseyre, 1969 ; Niemi et Näätänen, 1981 ; Mattes et Ulrich, 1997 ; Van der Lubbe et al., 2004). Par conséquent, l'utilisation d'une PP relativement courte ne permet pas de mettre en évidence les différences existantes en fonction du mode de présentation de la PP. En effet, dans les expériences 1 et 3 (présentation bloquée vs. aléatoire, respectivement), nous retrouvons une évolution identique du temps pré moteur et du TR en condition *Debout* suggérant une stratégie de préparation identique malgré la différence du mode de présentation de la PP. Cette absence de différence suggère donc que la présence d'un optimum de préparation à 700 ms en condition *Debout* est indépendante des stratégies actives de préparation du sujet.

1.3.2. Incertitude événementielle

Néanmoins, il est intéressant de constater une modification de la relation entre le temps pré moteur et la PP en fonction de la condition posturale dans l'expérience 4 par rapport à l'expérience 1. Le décalage de l'optimum de préparation en fonction de la condition posturale n'est pas retrouvé dans l'expérience 4, malgré une interaction entre la durée de la PP et la complexité posturale. Cette dernière montre, dans une tâche de TRS, une augmentation du temps pré moteur en fonction de la PP en condition *Assis* conforme à la littérature. Cependant, la condition *Debout* n'influencerait pas la relation entre le temps pré moteur et la durée de la PP. Cette différence entre les deux études peut être expliquée en terme d'incertitude de la tâche puisque les méthodologies utilisées entre ces deux expériences sont différentes. Durant un bloc d'essais de l'expérience 1, le sujet avait la possibilité de réaliser deux mouvements, l'élévation du bras droit ou du bras gauche selon une procédure de priming, où l'information du SI confirmait dans 70% des cas l'information du SP indiquant au sujet le bras à mobiliser. Bien que nous ayons manipulé deux types de mouvements dans l'expérience 4, la procédure utilisée permettait aux sujets de diminuer l'incertitude liée à l'exécution d'un mouvement. En effet, un bloc d'essai était composé à 80% d'essais où l'élévation du bras était requise et 20% d'essais où il fallait décoller la main du bouton-poussoir. Un autre bloc d'essais était présenté avec une inversion de ces probabilités. Deux blocs d'essais étaient alors présentés pour chaque durée de la PP. Ces deux méthodologies impliquent donc une orientation de l'attention différente. Avant le SP de la première expérience, le sujet n'avait pas la possibilité d'orienter son attention sur un événement précis puisque deux signaux préparatoires pouvaient survenir : soit à droite pour l'élévation du bras droit soit à gauche pour l'élévation du bras gauche. Cette orientation de l'attention était

différente et beaucoup plus spécifique lors de la dernière expérimentation puisqu'un seul signal préparatoire apparaissait en fonction du bloc d'essais : soit en haut indiquant une élévation de bras dans 80% des cas, soit en bas indiquant un décollement de la main dans 80% des cas. Dans ces conditions d'expérimentation, la dernière étude s'apparenterait donc plus à une tâche de TRS puisqu'avant l'apparition du SP, le sujet connaissait dans 80% des cas, le mouvement à exécuter. Le sujet serait donc plus apte à synchroniser sa préparation avec l'apparition du SI pour une durée de PP la plus courte. Les processus attentionnels liés à la production d'une réponse étant plus sollicités en condition bipédique (Vuillerme et al., 2004), nous observons une diminution du gain de la préparation en fonction de la durée de la PP dans cette expérience.

1.3.3. Effet de l'âge

L'expérience 4 rend donc compte d'une relation différente entre la PP, le TR et la condition posturale en fonction de la méthodologie utilisée. Au regard des résultats basés sur le TR, les personnes âgées seraient plus affectées par l'augmentation de la durée de la PP que les jeunes adultes quelle que soit la condition posturale. En condition *Assis*, le TR augmente de façon plus importante de la PP 300 ms à la PP 700 ms (de 310 ms à 380 ms, respectivement) alors que les jeunes adultes montrent une augmentation significative mais de moindre amplitude, de la PP 300 à la PP 500 ms, seulement (de 330 à 360 ms, respectivement). En condition *Debout*, les jeunes adultes montrent un TR qui n'augmente pas significativement alors que les personnes âgées montrent une augmentation du TR de la PP 700 à la PP 900 ms. Il semble donc que les personnes âgées soient déficitaires dans l'estimation du temps écoulé depuis le SP. La capacité de synchroniser sa préparation avec l'occurrence du SI serait donc détériorée avec l'âge. Nos résultats tendraient à montrer que le vieillissement s'accompagne d'une diminution de l'efficacité de la commande focale par rapport à la commande posturale. D'une part, l'effet de la durée de la PP avec l'âge semble s'étendre au niveau moteur puisque nous observons une diminution du temps d'accélération lors de la durée de la PP 900 ms se répercutant au niveau postural avec un moindre déplacement maximal arrière du CP. D'autre part, la programmation du mouvement semble se dégrader de manière plus importante que la programmation de la commande posturale. En effet, le temps d'accélération du mouvement focal prend une part beaucoup plus importante avec l'âge lorsque nous rapportons ce temps sur un laps de temps identique d'atteinte du pic maximal arrière du CP. Néanmoins, de nombreux résultats sur les données posturales de notre

étude suggèrent qu'en augmentant la population de personnes âgées, nous observerions une dégradation de la composante posturale au même titre que la composante focale de la coordination posture/mouvement.

2. PREPARATION D'UNE TACHE POSTURO-CINETIQUE ET APAS

Il est intéressant de noter que si l'optimum de préparation n'est pas modifié en fonction du type de préparation (*neutre* vs. *sélectif*), cela ne veut pas pour autant dire que les APAs ne pourraient pas être préparés durant la PP. Bien que cet optimum de préparation ne soit pas modifié dans les expériences 1 et 2, certains résultats supposaient que la commande posturale pouvait être préprogrammée durant la PP. D'une part, nous avons observé une absence de déplacement anticipé du CP dans la condition de préparation *neutre* par rapport à la préparation *sélective* (expérience 2 vs. expérience 1, respectivement). D'autres part, les études basées sur la chronométrie mentale ont montré une amélioration du TR en fonction de la nature de la préparation (Rival et Olivier, 2002). Ces deux informations pourraient donc mettre en évidence un processus en dérivation de la chaîne de traitement de l'information efficace pour préparer la commande posturale et focale. Cette hypothèse a été vérifiée dans le chapitre suivant (expérience 3). Les résultats de la troisième expérience ont permis de montrer un gain, tant au niveau du temps prémoteur que de la stabilité posturale via des APAs plus importants lorsqu'une information sur la perturbation posturale pouvait être traitée durant la PP. Bien que la présentation d'une information sur le délestage durant le SI n'implique pas une diminution des APAs, nous observons une augmentation du TR. Ce résultat suggère une augmentation du TR nécessaire afin de programmer une quantité d'APAs identique à la condition de préparation *sélective*. En d'autres termes, puisque le SNC ne pourrait pas préprogrammer une commande posturale durant la PP lors d'une préparation *neutre*, il prendrait alors un temps supplémentaire pour préparer les APAs durant le TR.

Ce résultat est en accord avec ceux de la dernière étude. Lorsqu'une reprogrammation est nécessaire, une augmentation du temps prémoteur est associée à une diminution de la latence des APAs. Le rapport entre la latence des APAs sur le temps prémoteur est donc plus important lors de la préparation *Valide* que lors de la préparation *Non-valide*. Le processus de préparation s'opérant durant la PP serait donc capable d'augmenter le gain de la commande focale et posturale. En d'autres termes, la programmation des APAs serait dépendante d'un niveau de préparation et non d'une stratégie uniquement dépendante de la longueur du TR.

Bien que nous ayons trouvé des corrélations plus ou moins importantes entre le temps prémoteur et la latence des APAs dans la première expérimentation, nous avons exclu l'hypothèse d'une programmation des APAs uniquement dépendante du temps accordé par le temps prémoteur (Slijper et al., 1998). Au regard des résultats de la dernière expérimentation, la reprogrammation d'un mouvement impliquerait une diminution de la latence des APAs au niveau électromyographique. Il s'ensuit une augmentation de l'instabilité posturale au regard du déplacement maximal vers l'avant du CP. De plus, le développement du moment vertical traduisant une certaine préparation du mouvement (Bleuse et al., 2002) est moins anticipé, le pic maximal étant moins important avec une phase positive moins dynamique. Sa durée s'allonge avec une intensité plus faible. Ces résultats sur l'effet d'une reprogrammation du mouvement focal vont à l'encontre des résultats de Brown et Frank (1987). Selon ces auteurs, la reprogrammation d'un mouvement nécessiterait un temps additionnel pour l'activation des muscles responsables de la commande focale et non de la commande posturale. Ils ont donc proposé un modèle parallèle de la coordination entre la posture et le mouvement en se basant sur une influence inhibitrice de la commande posturale sur la commande focale. Nous aboutissons à la même interprétation (processus parallèle) malgré nos résultats différents (aucun processus d'inhibition de la commande posturale sur la commande focale). Puisque la latence entre la commande focale et posturale n'est pas constante lors des deux niveaux de préparation (*Valide* vs. *Non-valide*), ces deux commandes seraient alors contrôlées par des commandes centrales séparées faisant directement référence au mode de contrôle parallèle de la coordination entre la posture et le mouvement. Cependant, ce travail montre des influences différentes de l'incertitude événementielle et temporelle de la préparation sur ce dialogue entre la posture et le mouvement.

3. INTERPRETATION DE LA COORDINATION POSTURE/MOUVEMENT EN FONCTION DE L'INCERTITUDE EVENEMENTIELLE ET TEMPORELLE DE LA PREPARATION

De nombreux travaux ont mis en exergue une diminution des APAs lors d'une tâche de temps de réaction simple par rapport à une tâche sans contrainte de déclenchement (Horak et al., 1984 ; Lee et al., 1987 ; Benvenuti et al., 1997 ; De wolf et al., 1998 ; Slijper et al., 2002 ; Bleuse et al., 2002). Cependant, dans notre travail, nous avons démontré une capacité de préprogrammation de la commande posturale durant la PP lorsque les informations étaient mises à disposition. En manipulant la durée de la période préparatoire, nous avons observé lors de l'optimum de préparation, un retard de l'activation de la commande posturale par

rapport à la commande focale. Ce résultat est observé quel que soit le mode de présentation (*aléatoire* vs. *bloqué*) et le type de préparation (*neutre* vs. *sélectif*). Bien que la commande posturale soit capable d'utiliser la PP pour sa préprogrammation, la commande anticipée semble retardée lorsque l'optimum de préparation est atteint, c'est-à-dire, lorsque le TR ou le temps prémoteur est le plus court.

Un premier modèle permettrait d'expliquer une amélioration de la stabilité via l'augmentation des APAs lors de la diminution de l'incertitude événementielle. Le modèle proposé (cf. Figure VII-1, page 151) représente les processus psychologique et neurophysiologique associés au mouvement volontaire. La diminution de l'incertitude événementielle est représentée par l'information mise à disposition durant le SP. Les phénomènes de préparation sont représentés par la sélection de la commande focale appropriée et de la réponse posturale à adopter. Nous supposons que les circuits centraux impliqués dans l'activation des synergies posturale et focale seraient progressivement organisés durant la période préparatoire après que le processus de sélection ait pris place. Au moment de l'apparition du SI, un deuxième processus serait engagé où le système de commande, impliquant le cortex associatif, les ganglions de la base et le cervelet, activerait ces deux synergies pré-sélectionnées. L'exécution de ces deux processus serait alors réalisée de manière séparée pour les raisons suivantes : 1) nous avons observé durant l'expérience 3 une activité posturale anticipée lorsqu'aucune perturbation posturale n'apparaissait, et 2) il a été montré précédemment (Mankovskii et al., 1980) que les personnes âgées pouvaient initier la commande focale sans la présence d'une activité anticipée de la commande posturale et par conséquent perdaient l'équilibre.

Ce modèle est très intéressant au regard de nos résultats puisqu'il montre comment la PP peut être utilisée afin de préparer la commande posturale indépendamment de la commande focale. La diminution des APAs dans la condition de préparation *Non-valide* par rapport à la préparation *Valide* (expérience 4) serait alors la cause de la sélection d'une autre synergie posturale mieux adaptée à la réponse motrice. Le rapport entre le TR et la latence des APAs étant inférieur en condition de préparation *Non-valide*, ce résultat confirmerait un processus de sélection différenciée entre les deux commandes. Les résultats issus de l'expérience 3 apporteraient du poids à cette affirmation dans la mesure où l'information présentée durant le SP, renseignant sur la perturbation posturale et non sur le mouvement focale, permettait d'augmenter la stabilité posturale. Le deuxième intérêt de ce modèle permet de dissocier les effets de l'incertitude événementielle de ceux de l'incertitude temporelle liés à

la tâche posturo-cinétique. L'expérience 3 montre deux effets simples, la nature de la préparation (*neutre* vs. *sélective* : incertitude événementielle) et l'incertitude temporelle de la préparation (durée de la PP : incertitude temporelle) influençant le temps prémoteur associé au délestage du poids. L'absence d'une interaction entre ces deux paramètres suggère donc que les processus liés à l'incertitude événementielle, d'une part, et à l'incertitude temporelle, d'autre part, sont indépendants l'un de l'autre. Par conséquent, la modulation de la relation entre le temps prémoteur et la latence des APAs en fonction de la PP, observée dans nos différentes études semblerait être une caractéristique intrinsèque du système de commande. Ce dernier permettrait de coordonner la posture et le mouvement indépendamment de la sélection des synergies posturales et focales.

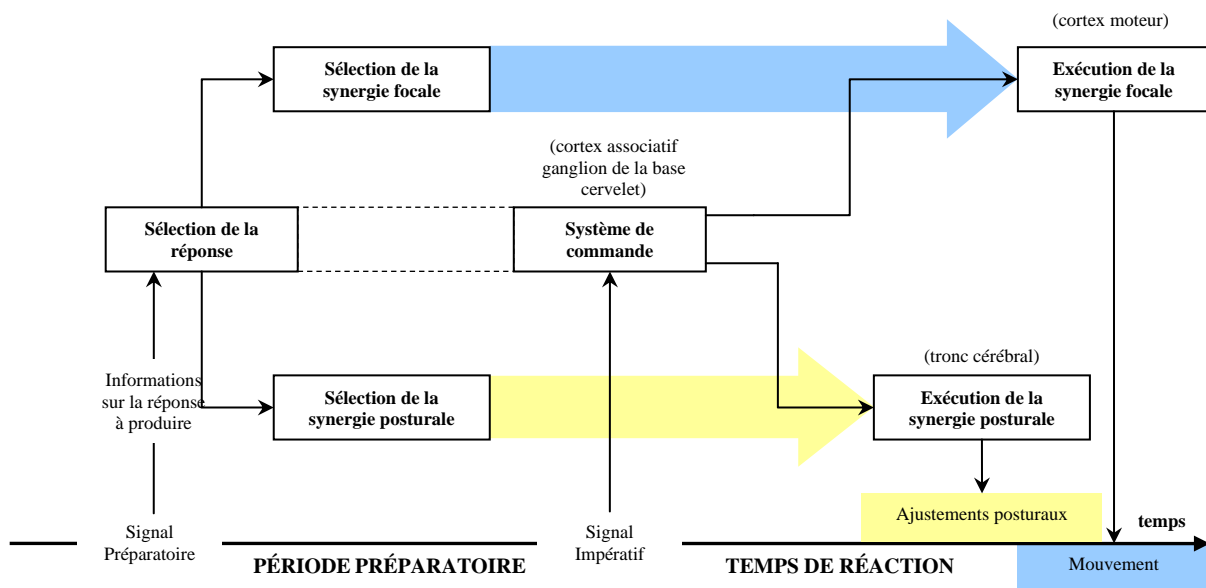


Figure VII-1 : Modèle des processus psychologique et neurophysiologique impliqués dans la préparation et l'initiation des ajustements posturaux anticipés (Adapté de Woollacott et al., 1984)

Comme nous venons de le voir, ce modèle ne peut pas expliquer la modification de la relation APAs-TR en fonction de l'incertitude temporelle de la préparation (durée de la PP). Maeda et Fujiwara (2006) ont recherché les relations entre l'état de préparation du cerveau durant la période préparatoire en utilisant la variation contingente négative (VCN) et les APAs. Cette VCN est connue pour décroître lors de l'augmentation du TR en fonction d'une augmentation de la durée de la PP (McAdam et al., 1969), montrant ainsi une corrélation positive avec la vitesse de réaction du sujet (Rebert et al., 1967 ; Hillyard, 1969). La diminution de l'amplitude de la VCN correspondrait alors à une augmentation de la difficulté à prédire le moment d'apparition du SI. Maeda et Fujiwara (2006) montrent bel et bien un

effet de la durée de la PP sur les APAs dans une tâche d'élévation bilatérale des bras. Manipulant trois durées de PP (2, 3 et 3.5 sec), ils ont calculé l'intégration de la VCN sur la fenêtre de 100 ms avant l'apparition du SI. Leurs résultats montrent une diminution de cette variable de la PP 2 sec à la PP 3.5 sec sans modification du TR et avec un temps de latence anticipé plus important des gastrocnémiens. L'augmentation de la durée de la PP conduirait alors à une diminution de la préparation du sujet mais à une augmentation de la latence des APAs. Ces résultats suggèrent l'émergence d'une stratégie posturale consistant à augmenter la latence des APAs lorsque le moment d'apparition du SI est difficile à prédire. Nous retrouvons des résultats identiques lors de la manipulation de la durée de la PP variant entre 300 et 900 ms. Lors de la première expérimentation, nous avons observé un retard du déplacement anticipé du CP par rapport à l'initiation de la commande focale lors de la PP optimale (c'est-à-dire, le TR le plus court). Ce retard était accompagné d'une diminution du déplacement anticipé du CP avec une augmentation du temps nécessaire pour atteindre le pic maximal arrière. Lors de la deuxième expérimentation, l'utilisation d'une préparation neutre a augmenté la variabilité du déplacement du CP. Nous nous sommes donc reportés sur une variable dépendante plus stable, le moment vertical T_z décrit par Bleuse et al. (2002). L'analyse de cette variable a permis de retrouver ce phénomène. Un retard dans l'apparition du pic maximal et minimal a été observé lors de l'optimum de préparation. Enfin, lors du délestage du poids (expérience 3), l'accélération des bras suite au délestage était plus importante lors de l'optimum de préparation, signe d'une moins bonne commande anticipée au niveau du deltoïde antérieur. Ce constat se retrouve au niveau du reste du corps puisque l'inhibition anticipée des muscles erector spinae et biceps femoris était moins importante lors de cet optimum. Le phénomène mécanique qui en résulte provoque un déplacement du CP moins important vers l'arrière 100 ms après le délestage impliquant une augmentation du déplacement maximal vers l'avant et vers l'arrière.

Nos résultats indiqueraient alors que le SNC pourrait gagner du temps en retardant l'apparition de la commande posturale au profit de l'apparition de la commande focale. Il est peut probable que la relation entre ces deux commandes soit dépendante d'un processus d'inhibition de la commande posturale sur la commande focale comme le suggère le modèle en parallèle présenté dans le cadre théorique. En effet, ce modèle prévoit cette inhibition si les conditions posturales nécessaires à la conservation de l'équilibre ne sont pas remplies. Cette inhibition se traduirait par un délai d'activation de la commande posturale par rapport au SI identique lors d'une préparation *Valide* et *Non-valide*. Avec l'action de cette commande

inhibitrice, on devrait observer une augmentation du TR lors de la préparation *Non-valide* comme en attestent les résultats de Brown et Frank (1987). Nos résultats ne sont pas en accord avec ce principe d'inhibition puisque nous retrouvons une diminution de la latence des APAs associée à une augmentation du TR lors d'une préparation *Non-valide* par rapport à une préparation *Valide*. Cette diminution des APAs conduit à créer un moment vertical moins dynamique limitant ainsi la participation du corps dans la production de l'élévation du bras (Bleuse et al., 2005). Nous observons un déclenchement de la commande focale plus rapide alors que les conditions d'optimisation du mouvement et de stabilité posturale ne sont pas remplies. La relation entre la commande focale et posturale indiquerait que les deux systèmes sont regroupés dans un même programme moteur. Ceci n'exclut pas cependant que les contraintes posturales et focales soient spécifiées de manière distincte en amont. En effet, l'expérience 3 montre que le système de commande est capable de prendre en compte, durant la PP, une information sur la perturbation posturale à venir afin d'optimiser la commande posturale. De plus, cette expérience montre que le sujet peut préparer une réponse posturale anticipée même lorsqu'aucune perturbation ne doit survenir. Ces deux résultats suggèrent donc une préparation de la commande posturale relativement indépendante de la préparation du mouvement focal. Ainsi, la programmation motrice et donc la relation APAs-TR serait dépendante des contraintes posturales et focales s'exerçant sur le système (cf. Figure VII-2). En fonction de l'importance de ces contraintes respectives, le système de commande pourrait alors privilégier l'exécution de la commande focale (dans notre cas) au détriment de la commande posturale.

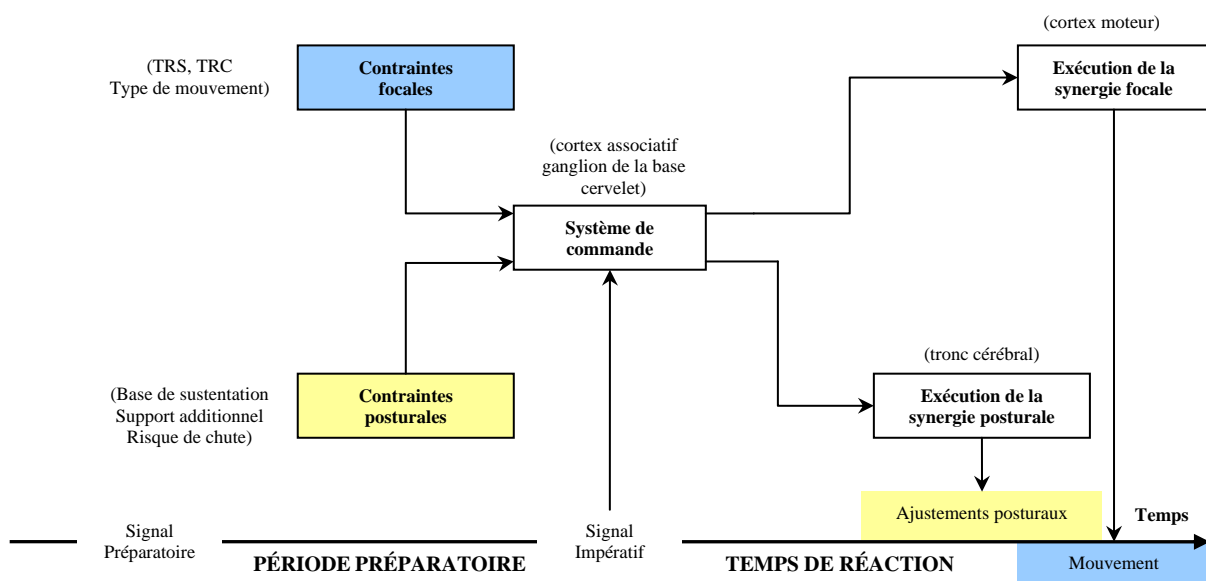


Figure VII-2 : Effets des contraintes posturale et focale sur la coordination entre la posture et le mouvement (Adapté de Woollacott et al., 1984)

L'idée d'une modification de la coordination entre la posture et le mouvement en fonction de ces deux contraintes n'est pas incompatible avec les données de la littérature. En effet, lorsque la contrainte posturale augmente, par exemple dans le cas d'un délestage à partir d'une posture initiale unipodale (Aruin et al., 1998) ou dans le cadre d'une élévation d'un bras lors d'une instabilité posturale dans le plan sagittal (Gantchev et Dimitrova, 1996 ; Slijper et Latash, 2000), ces auteurs montrent une diminution des APAs. Ces résultats suggèrent que dans le cas d'une instabilité posturale initiale importante, les APAs seraient une source potentielle de déséquilibre, l'atténuation des APAs serait alors une stratégie délibérée de la part du SNC. Dans cette condition initiale d'instabilité, la commande focale s'en trouve perturbée puisque le pic d'accélération du mouvement focal est réduit (Slijper et Latash, 2000). Notre travail a permis de montrer que lors d'une posture bipédique, le SNC privilégierait la commande focale au détriment de la commande posturale anticipée en fonction de la durée de la PP. Nous supposons donc l'existence d'une évaluation des différentes contraintes posturales et focales durant la période préparatoire. Puisque l'instabilité posturale est plus importante lors de la position bipédique par rapport à la condition *Assis* (expérience 2), cette évaluation des contraintes liées à la coordination posture/mouvement prendrait plus de temps. Nous trouverions alors une explication à l'augmentation de la PP optimale quand on passe d'une condition *Assis* à une condition *Debout*. Comme nous l'avons vu, cette augmentation serait indépendante de la présence des APAs (présents en position *Assis* au regard de l'expérience 2).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail était d'analyser les processus de préparation à l'action lorsque la tâche motrice à exécuter engendrait une perturbation posturale. Pour ce faire, nous avons manipulé 1) la durée de la période préparatoire, et 2) l'information présentée durant cette période susceptible d'influencer l'état de préparation du sujet au regard de l'évolution du TR. Nous avons apporté des arguments en faveur d'une préparation des APAs indépendante de la préparation du mouvement focal. Durant la PP, l'utilisation d'une information renseignant sur la perturbation posturale permet 1) d'augmenter la stabilité posturale consécutive à cette perturbation, et 2) d'améliorer le temps de réaction du sujet. Ces résultats montrent que le SNC est capable de traiter une information posturale préalable en vue d'optimiser son action. Nous avons observé un retard des APAs associé à une augmentation du TR dans le cas d'une reprogrammation du mouvement conduisant à une préparation obsolète. Ce résultat montre clairement une utilisation efficace de la PP afin de préparer la coordination entre la posture et le mouvement. La programmation des APAs n'est donc pas uniquement dépendante du temps imparti par la longueur du TR. La préparation de la tâche posturo-cinétique serait influencée par des contraintes événementielles et temporelles impliquant des effets opposés au regard de leur impact sur les différentes étapes de traitement de l'information. La réduction de l'incertitude événementielle durant la PP permettrait de sélectionner la synergie posturale à adopter durant la PP et tendrait à augmenter la latence des APAs. Ce type d'incertitude influence l'étape de sélection de la réponse située en amont de la chaîne de traitement. L'incertitude temporelle de la préparation, quant à elle, influencerait l'étape des ajustements moteurs, susceptible de modifier la coordination posture/mouvement. Lorsque l'incertitude temporelle est réduite, le SNC privilégierait la commande focale par rapport à la commande posturale, réduisant ainsi la latence des APAs et retardant la commande posturale.

Notre travail a permis de mettre en exergue l'influence de deux facteurs influençant le niveau de préparation d'une coordination posture/mouvement. L'utilisation d'une durée de la PP relativement courte (moins de 1 sec) nous a permis d'observer un optimum de préparation différent en fonction de la condition posturale. Cependant, la conservation de cette fenêtre n'a pas permis de mettre en évidence la modification de la stratégie du sujet en fonction du mode de présentation de la durée de la PP (bloquée vs. aléatoire). Lors d'expérimentations futures, il serait intéressant d'augmenter cette durée pour que le sujet puisse avoir le temps de développer une stratégie de préparation particulière. De nombreuses autres perspectives de

recherche peuvent être envisagées afin d'approfondir ce travail situé à l'intersection de deux thématiques (chronométrie mentale et interactions posture/mouvement). Si le niveau de préparation influence la coordination entre la commande posturale et la commande focale, il serait intéressant de compléter ces résultats en testant les effets d'autres facteurs influençant la préparation. Par exemple, des études ont permis de montrer que la relation PP-TR n'est pas seulement dépendante de l'essai immédiat mais aussi de l'effet de la durée de la PP de l'essai précédent (Drazin, 1961 ; Niemi et Näätänen, 1981 ; Los et al., 2001 ; Van der Lubbe et al., 2004). Cet effet séquentiel est marqué par une augmentation du TR lorsque la durée de la PP précédente est supérieure à la durée de la PP actuelle. En revanche, ce TR est identique lorsque la durée de la PP précédente est plus courte que la durée de la PP actuelle. Important mais souvent ignoré, cet effet séquentiel influencerait grandement l'effet principal de la durée de la PP sur le TR. La moyenne des essais n avec une durée de PP courte est constituée, dans une large proportion, d'essais ayant une longue PP durant l'essai $n-1$. A l'inverse, la moyenne des essais n avec une durée de PP longue est constituée dans une large proportion d'une PP courte lors de l'essai $n-1$, ce qui n'affecterait pas le TR. Au regard de ces études portant sur la chronométrie mentale, deux autres facteurs peuvent influencer la préparation motrice : la nature et l'intensité du signal impératif (Bertelson et Tisseyre, 1969 ; Niemi et Näätänen, 1981 ; Mattes et Ulrich, 1997). La nature auditive du SI permettrait de diminuer le TR par rapport à un SI visuel sans pour autant modifier l'effet de la durée de la PP sur le TR. De même, une forte intensité (85 dB vs. 55 dB) permettrait d'augmenter la préparation motrice via une diminution du TR. Enfin, puisque l'optimum de préparation s'avère dépendant de la condition posturale, il serait intéressant d'identifier la stratégie de préparation de la coordination posture/mouvement en fonction du développement de l'enfant. En effet, cet optimum diminue de 6 à 10 ans lors d'une réponse motrice exécutée en position *Assis* et n'influençant pas la stabilité posturale (Morrison, 1982 ; Adams et Lambos, 1986 ; Olivier et Rival, 2002). Cependant, avant toutes perspectives, il conviendrait de compléter l'expérience 4 (de nature exploratoire), avec une population de personnes âgées plus importante afin d'approfondir l'influence de l'âge sur la coordination posture/mouvement.

« La recherche procède par des moments distincts et durables, intuition, aveuglement, exaltation et fièvre. Elle aboutit un jour à cette joie, et connaît cette joie celui qui a vécu des moments singuliers. »

A. Einstein

BIBLIOGRAPHIE

- Adams RJ, Lambos WA (1986) Developmental changes in response preparation to visual stimuli. *Perceptual and Motor Skills*, 62: 519-522.
- Allen GI, Tsukahara N (1974) Cerebrocerebellar communication systems. *Physiological Review*, 54: 957-1006.
- Amrhein PC, Goggin NL, Stelmach GE (1991) Age differences in the maintenance and restructuring of movement preparation. *Psychology and Aging*, 6: 451-466
- Anson JG (1982) Memory drum theory: Alternative tests and explanations for the complexity effects on simple reaction time. *Journal of Motor Behavior*, 14: 228-246.
- Aruin AS, Forrest WR, Latash ML (1998) Anticipatory postural adjustments in conditions of postural instability. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 109: 350-359.
- Aruin AS, Latash ML (1995a) Directional specificity of postural muscles in feed-forward postural reactions during fast voluntary arm movements. *Experimental Brain Research*, 103: 323-332.
- Aruin AS, Latash ML (1995b) The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations. *Experimental Brain Research*, 106: 291-300.
- Aruin AS, Latash ML (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 AS, Shiratori T, Latash, ML (2003) The role of action in postural preparation for loading and unloading in standing subjects. *Experimental Brain Research*, 138: 458-466.
- Aruin AS, Shiratori T (2003) Anticipatory postural adjustments while sitting: The effects of different leg supports. *Experimental Brain Research*, 151: 46-53.

- Aruin AS, Zatsiorsky VM (1989) Ergonomicheskaia Biomechanika. (Occupational Biomechanics). Mashinostroenie, Moscow.
- Babinski J (1899) De l'asynergie cérébelleuse. *Review of Neurology*, 7:806-816.
- Belenkiy VE, Gurfinkel VS, Paltsev EI (1967) On Elements of Control of Voluntary Movements. *Biofizika*, 12: 135-141.
- Benvenuti F, Stanhope SJ, Thomas SL, Panzer VP, Hallett M (1997) Flexibility of anticipatory postural adjustments revealed by self-paced and reaction-time arm movements. *Brain Research*, 761: 59-70.
- Bertelson P (1967) The time course of preparation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 19: 272-279.
- Bertelson P, Boons JP (1960) Time uncertainty and choice reaction time. *Nature*, 187: 531-532.
- Bertelson P, Tisseyre F (1968) The time course of preparation with regular and irregular foreperiods. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20: 297-300.
- Berthoz A (1997) Le sens du mouvement. In : Odile Jacob(Ed.), *Sciences*. Paris.
- Bleuse S, Cassim F, Blatt JL, Defebvre L, Guieu JD (2002) Anticipatory postural adjustments associate with arm flexion: interest of the vertical torque. *Clinical Neurophysiology*, 32: 352-360.
- Bleuse S, Cassim F, Blatt JL, Defebvre L, Derambure P, Guieu JD, (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 JL, Labyt E, Derambure P, Guieu JD, Defebvre L (2005) Effect of age on anticipatory postural adjustments in unilateral arm movement. *Gait & Posture* (sous presse).
- Bonnetblanc F, Martin O, Teasdale N (2004) Pointing to a target from an upright standing position: anticipatory postural adjustments are modulated by the size of the target in humans. *Neurosciences Letters*, 358: 181-184.

- Boons JP, Bertelson P (1961) L'influence de l'incertitude temporelle sur le temps de réaction de choix. *L'Année Psychologique*, 61: 361-376.
- Bouisset S, Zattara M (1981) A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neuroscience Letters*, 22: 263-270;
- Bouisset S, Zattara M (1987a) Postural muscular activities and intentional movements. *Medical Sport Sciences*, 26: 163-173.
- Bouisset S, Zattara M (1987b) Biomechanical study of the programming of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement. *Journal of Biomechanics*, 20: 735-742.
- Bouisset S, Zattara M (1988) Anticipatory postural adjustments and dynamic asymmetry. In: V.S. Gurfinkel, M.E. Ioffé, J. Massion & J.P. Roll (Eds.), *Stance and Motion: Facts and Concepts*, (pp. 177-183). New York: Plenum Press.
- Bouisset S, Zattara M (1990) Segmental movement as a perturbation to balance ? Facts and concepts. In: J.M. Winters & S.L. Woo (Eds.), *Multiple muscle systems. Biomechanics and Movement Organization* (pp. 498-506). New York: Springer.
- Boxtel van GJ, Brunia CH (1994) Motor and non-motor aspects of slow brain potentials. *Biological Psychology*, 38: 37-51.
- Brown JE, Frank JS (1987) Influence of event anticipation on postural actions accompanying voluntary movement. *Experimental Brain Research*, 67: 645-650.
- Brown VJ, Robbins TW (1991) Simple and choice reaction time performance following unilateral striatal depletion in the rat. *Brain*, 114: 513-525.
- Brown SH, Haumann ML, Potvin JR (2003) The responses of leg and trunk muscles to sudden unloading of the hands: implications for balance and spine stability. *Clinical biomechanics*, 18: 812-820.
- Carter MC, Shapiro DC (1984) Control of sequential movements: Evidence for generalized motor programs. *Journal of Neurophysiology*, 52(5): 787-796.
- Cordo PJ, Nashner LM (1982) Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements. *Journal of Neurophysiology*, 47: 287-302.

- Correa A, Lupiàñez J, Tudela P (2006) the attentional mechanism of temporal orienting: determinants and attributes. *Experimental Brain Research*, 169: 58-68.
- Crenna P, Frigo C, Massion J, Pedotti A (1987) Forward and backward axial synergies in man. *Experimental Brain Research*, 65: 538-548.
- Cuisinier R, Olivier I, Nougier V (2005) Effect 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.
- Cuisinier R, Olivier I, Nougier V (2006) The increased foreperiod duration to attain the neutral preparation from sitting to standing. *Experimental Brain Research* (soumis).
- De Wolf S, Slijper H, Latash ML (1998) Anticipatory postural adjustments during self-paced and reaction time movements. *Experimental Brain Research*, 121: 7-19.
- Dichgans J, Brandt T (1978) Visual-vestibular interaction : effects on self-motion perception and postural control. In: R.H. Leibowitz & H.J. Teuber (Eds.), *Handbook of sensory physiology, vol. 3, Perception*, (pp. 756-804). Berlin: Springer.
- Dick JPR, Rothwell JC, Berardelli A, Thompson PD, Gioux M, Benecke R, Day BL, Marsden CD (1986) Associated postural adjustments in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 49: 1378-1385.
- Dietz V, Kowalewski R, Nakazawa K, Colombo G (2000) Effects of changing stance conditions on anticipatory postural adjustment and reaction time to voluntary arm movement in humans. *Journal of Physiology*, 524: 617-627.
- Donders FR (1868/traduit en 1969) On the speed of mental processes. In: W.G. Koster (Ed.), *Attention and performance II* (pp. 412-431). Amsterdam: North-Holland.
- Drazin DH (1961) Effects of foreperiod, foreperiod variability, and probability of stimulus occurrence on simple reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 62:43-50.
- Droulez J (1988) Topological aspects of sensori-motor control. In: V.S. Gurfinkel, M.E. Ioffe, J. Massion & J.P. Roll (Eds.), *Stance and motion: facts and concepts* (pp. 251-259). New York: Plenum Press.

- 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.
- Eng JJ, Winter DA, MacKinnon CD, Patla AE (1992) Interaction of the reactive moments and centre of mass displacement for postural control during voluntary arm movements. *Neuroscience Research Communications*, 11: 73-80.
- Fiori N, Semjen A, Requin J (1974) Analyse chronométrique du pattern préparatoire à un mouvement spatialement orienté : Résultats préliminaires. *Le travail humain*, 37: 229-248.
- Fraisse P (1963) *The psychology of time*. Harper & Row, New York.
- Franz EA, Miller J (2002) Effects of response readiness on reaction time and output in people with Parkinson's disease. *Brain*, 125: 1733-1750.
- Friedli WG, Cohen L, Hallett M, Stanhope S, Simon SR (1988) Postural adjustments associated with rapid voluntary arm movements. II. Biomechanical Analysis. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 51: 232-243.
- Fritsch G, Hitzig E (1870) über die elektrische erregbarkeit des grosshirns. *Arch. F. Anat. Physiol. Und Wissenschaftl. Mediz.*, 4: 300-332.
- Frowein HW, Sanders AF (1978) Effects of visual stimulus degradation, S-R compatibility and foreperiod duration on choice reaction time and movement time. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 12(2): 106-108.
- Guadagnoli MA, Reeve TG (1992) Movement complexity and foreperiod effects on response latency for aimed movements. *Journal of Human Movement Studies*, 23: 29-39.
- Gahéry Y, Massion J (1981) Co-ordination between posture and movement. *Trends in Neurosciences*, 4: 199-202.
- 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.

- Gantchev GN, Dimitrova DM (1996) Anticipatory postural adjustments associated with arm movements during balancing on unstable support surface. *Int. J. Psychophysiol.*, 22: 117-122.
- Garland SJ, Stevenson TJ, Ivanova T (1997) Postural responses to unilateral arm perturbation in young, elderly and hemiplegic subjects. *Archive of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78: 1072-1077.
- Gélat T, Caron O, Rougier P (1996) Influence of the initial projection of the centre of gravity on posturo-kinetic coordination in humans. Application from a horizontal quadrupedal stance during voluntary limb raising. *Human Movement Science*, 15: 79-99.
- Georgopoulos AP, Kalaska JF, Massey JT (1981) Spatial trajectories and reaction times of aimed movement: effects of practice, uncertainty and change in target location. *Journal of Neurophysiology*, 46:725-743.
- Gibbon J, Church RM, Meck WH (1984) Scalar timing in memory. In: J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Timing and time perception*. Annals of New York Academy of Sciences New York.
- Goggin NL, Meeuwssen (1992) Age-related differences in the control of spatial aiming movements. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 63: 366-372.
- Goggin NL & Stelmach GE (1990) Age related deficits in cognitive-Motor skills. In: E.A. Lovelace (Ed.), *Aging and Cognition: Mental processes, self awareness and interventions* (pp. 135-155). North-Holland.
- Goggin NL & Stelmach GE, Amrhein PC (1989) Effects of age on motor preparation and restructuring. *Bulletin of Psychomotric Society*, 27: 199-202.
- Gottsdanker R (1980) Aging and the maintenance of preparation. *Experimental Aging Research*, 6: 13-27.
- Gottsdanker R (1982) Age and simple reaction time. *Journal of Gerontology*, 37: 342-348.
- Goutal L, Lino F, Bouisset S (1994) Modalités de l'appui corporel et vitesse du mouvement de pointage. *Arch. Int. Physiol. Biochim. Biophys.*, 102: C21.

- Gurfinkel VS, Levik YS, Popov KE, Smetanin BN (1988) Body scheme in the control of postural activity. In: V .S. Gurfinkel, M.E. Ioffe, J. Massion & J.P. Roll (Eds.), *Stance and motion : facts and concepts* (pp. 185-193). New York: Plenum Press.
- Hauert CA, Zanone PG, Mounoud P (1990) Development of motor control in the child : Theoretical and experimental approaches. In: O. Newman & W. Prinz (Eds.) *Relationships between perception and action* (pp 325-343). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hasbroucq T, Akamatsu M, Mouret I, Seal J (1995) Finger pairings in choice reaction time task: does between hands advantage reflect response preparation ? *Journal of Motor Behavior*, 27: 21-26.
- Hasbroucq T, Kaneko H, Akamatsu M, Possamaï CA (1997) Preparatory inhibition of cortico-spinal excitability : a transcranial magnetic stimulation study in man. *Cognitive Brain Research*, 5: 185-192.
- Hasbroucq T, Kaneko H, Akamatsu M, Possamaï CA (1999) The time-course of preparatory spinal and cortico-spinal inhibition: an H-reflex and transcranial magnetic stimulation study in man. *Experimental Brain Research*, 124: 33-41.
- Hay L, Redon C (1999) Feedforward versus feedback control in children and adults subjected to a postural disturbance. *Experimental Brain Research*, 125: 153-162.
- Henry FM, Rogers DE (1960) Increased response latency for complicated movements and a 'memory drum' theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, 31(3): 448-458.
- Hess WR (1943) Teleokinetisches und ereismatisches Kräftesystem in der biomotorik. *Helv. Physiol. Pharmacol.*, acta 1, C62-C63.
- Hick WE (1952) On the rate of gain information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4: 2-26.
- Hillyard SA (1969) Relationships between the contingent negative variation (CNV) and reaction time. *Physiological Behavior*, 4: 351-357.
- Hiraku S, Sakuma H (1996) Effects on contingent negative variation of set created by anticipating variable foreperiods. *Perceptual and Motor skills*, 83: 1163-1169.

- Holender D (1980) Le concept de préparation à réagir dans le traitement de l'information. In: J. Requin (Ed.), *Anticipation et comportement*, (pp.29-64). Editions du CNRS, Paris.
- Horak FB, Esselman P, Anderson ME, Lynch MK (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 FB, Nashner LM (1986) Central Programming of Postural Movements: Adaptation to Altered Support-Surface Configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55: 1369-1381.
- Hugon M, Massion J, Wiesendanger M (1982) Anticipatory postural changes induced by active unloading and comparison with passive unloading in man. *Pflügers Arch.*, 393: 292-296.
- Inglin B, Woollacott M (1988) Age-related changes in anticipatory postural adjustments associated with arm movements. *Journal of Gerontology*, 43: 105-113.
- Ioffé ME, Andreyev AE (1969) Coordination between the extremities during realization of local motor conditioned reactions in dogs. *Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. IM I P Pavlova*, 19: 557-65.
- Kaminski TR, Simpkins S (2001) The effects of stance configuration and target distance on reaching. I. Movement preparation. *Experimental Brain Research*, 136: 439-446.
- Keele SW (1968) Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70: 387-403.
- Keele SW (1981) Behavioral analysis of movement. In: V.B. Brooks (ed.), *Handbook of physiology, Section 1: The Nervous system, Motor control, vol 2* (pp. 1391-1414). Williams and Wilkins, Baltimore.
- Kerr B (1978) Reaction time analysis of programmed control. In: R. Rutton (Ed.), *Exercise and Sport Science Reviews (Vol. V)*, Santa Barbara, CA : Journal Publishing Affiliates.
- King DL, Zatsiorsky VM (1997) Extracting gravity line displacement from stabilographic recordings. *Gait and Posture*, 6: 27-38.

- Klapp ST (1978) Reaction time analysis of programmed control. In: R.S. Hutton (Ed.), *Exercise and Sport Science Reviews Reviews (Vol. V)* (pp. 231-253), Santa Barbara, Journal Publishing Affiliates.
- Klapp ST, Wyatt EP, Lingo WM (1974) Response programming in simple and choice reactions. *Journal of Motor Behavior*, 6: 263-271.
- Klapp ST (1996) Reaction time analysis of central motor control. In: H.N. Zelaznik (Eds.), *Advances in Motor Learning and Control*, Human Kinetics (pp. 13-35). Champaign, IL.
- Klein RM, Kerr B (1974) Visual signal detection and the locus of the foreperiod effects. *Memory and Cognition*, 2: 431-435.
- Klemmer ET (1956) Time uncertainty in simple reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 51(3): 179-84.
- Lajoie Y, Teasdale N, Bard C, Fleury M (1993) Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Experimental Brain Research*, 97: 139-144.
- Lajoie Y, Teasdale N, Bard C, Fleury M (1996) Upright standing and gait: are there changes in attentional requirements related to normal aging ? *Experimental Aging Research*, 22: 185-198.
- Larish DD, Stelmach GE (1982) Preprogramming, programming and reprogramming of aimed hand movements as a function of age. *Journal of Motor Behavior*, 14: 322-340.
- Latash ML (2000) Modulation of simple reaction time on the background of an oscillatory action: implications for synergy organization. *Experimental Brain Research*, 131: 85-100.
- Le Bozec S, Goutal L, Bouisset S (1997) Dynamic postural adjustments associated with the development of isometric forces in sitting subjects. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Serie III, Sciences de la vie*, 320 :715-720.
- Le Bozec S, Lesne J, Bouisset S (2001) A sequence of postural muscle excitations precedes and accompanies isometric ramp efforts performed while sitting in human subjects. *Neuroscience Letters*, 303: 72-76.

- Le Bozec S, Bouisset S (2004) Does postural chain mobility influence muscular control in sitting ramp pushes? *Experimental Brain Research*, 158: 427-3437.
- Lee W (1980) Anticipatory control of postural and task muscles during rapid arm flexion. *Journal of Motor Behavior*, 12: 185-196.
- Lee WA, Buchanan TS, Rogers MW (1987) Effects of arm acceleration and behavioural conditions on the organization of postural adjustments during arm flexion. *Experimental Brain Research*, 66: 257-270.
- Lee WA, Michaels CF, Pai Y-C (1990) The organization of torque and EMG activity during bilateral handle pulls by standing humans. *Experimental Brain Research*, 82: 304-314.
- Lépine D, Glencross D, Requin J (1989) Some experimental evidence for and against a parametric conception of movement programming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(2): 347-362.
- Lino F, Duchêne JL, Bouisset S (1992) Effect of seat contact area on the velocity of a pointing task. In: P. Belloti & A. Capozzo (Eds.), *Biomechanics* (pp.232). Università La Sapienza, Rome.
- Los SA, Knol DL, Boers RM (2001) Looking inside the motor adjustment stage. Conditioning as a basis for non-specific preparation. *Acta Psychologica*, 106: 121-145.
- Macar F, Bonnet M (1997) Event-related potentials during temporal information processing. In : G.J. Van Boxtel & K.B.E. Böker (Eds.), *Brain and Behavior past present and future* (pp. 49-66). Tilburg University Press: Tilburg.
- Mackenzie CL, Marteniuck RG, Dugas C, Liske D, Eickmeier B (1987) Three dimensional movement trajectories in Fitts' task: Implications for control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 39: 629-647.
- Mackworth JA (1970) *Vigilance and Habituation*. London: Penguin Press.
- Maeda K, Fujiwara K (2006) Effects of preparatory period on anticipatory postural control and contingent negative variation associated with rapid arm movement in standing posture. *Gait & Posture* (sous presse).

- Mankovskii NB, Mints AY, Lysenyuk VP (1980) Regulation of the preparatory period for complex voluntary movement in old and extreme old age. *Human Physiology (Moscow)*, 6: 46-50.
- Martenuik RG, MacKenzie CL (1981) Method in the study of motor programming: Is it just a matter of simple vs. choice reaction time? A comment on Klapp et al. *Journal of Motor Behavior*, 13: 313-319.
- Marteniuk RG, MacKenzie CL, Jeannerod M, Athenes S, Dugas C (1987) Constraints on human arm movement trajectories. *Canadian Journal of Psychology*, 41: 365-378.
- Martin JP (1967) The basal ganglia and posture. London: Pitman.
- Martin O, Teasdale N, Simoneau M, Corbeil P, Bourdin C (2000) Pointing to a target from an upright position in human: tuning of postural responses when there is target uncertainty. *Neuroscience Letters*, 281: 53-56.
- Massion J (1992) Movement, Posture and equilibrium: interaction and coordination. *Progress in Neurobiology*, 38: 35-56.
- Massion J (1994) Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4: 877-887.
- Massion J (1994) Postural control system in developpemental perspective. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22(4): 465-72.
- Massion J, Dufossé M (1988) Coordination between posture and movement: why and how? *NIPS*, 3: 88-93.
- Massion J, Viallet, F (1990) Posture, coordination, mouvement. *Rev Neurol (Paris)*, 146(10): 536-542.
- Mattes S, Ulrich R (1997) Response force is sensitive to the temporal uncertainty of response stimuli. *Perception and Psychophysics*, 57(7): 1089-1097.
- McAdam DW, Knott JR, Rebert CS (1969) Cortical slow potential changes in man related to interstimulus interval. *Psychophysiology*, 5: 349-358.
- McChesney JW, Sveistrup H, Woolacott MH (1996) Influence of auditory precuing on automatic postural responses. *Experimental Brain Research*, 108: 315-320.

- Meyer DE, Abrams RA, Kornblum S, Wright CE, Smith JEK (1988) Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements. *Psychological Review*, 95: 340-370.
- Mochizuki G, Ivanova TD, Garland SJ (2004) Postural muscle activity during bilateral and unilateral arm movements at different speeds. *Experimental Brain Research*, 155: 352-361.
- Moore S, Brundt D (1991) Effects of trunk support and target distance on postural adjustments prior to a rapid reaching task by seated subjects. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 72: 638-641.
- Moore S, Brundt D, Nesbitt ML, Juarez T (1992) Investigation of evidence for anticipatory postural adjustments in seated subjects who performed a reaching task. *Physical Therapy*, 72: 335-343.
- Morrison FJ (1982) The development of alertness. *Journal of Experimental Child Psychology*, 34: 187-199.
- Mouchnino L, Aurenty R, Massion J, Pedotti A (1991) Strategies for simultaneous control of equilibrium and of the head position during the raising movement of a leg. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série III. Sciences de la vie*, 312:225-232.
- 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, Aurenty R, Massion J, Pedotti A (1993) Is the trunk a reference frame for calculating leg position? *Neuroreport*, 4: 125-127.
- Mouchnino L, Cincera M, Fabre JC, 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: 1212-23.
- Näätänen R (1971) Non-aging fore-periods and simple reaction time. *Acta Psychologica*, 35: 316-327.
- Näätänen R, Muranen V, Merisalo A (1974) Timing of expectancy peak in simple reaction time. *Acta Psychologica*, 38: 461-470.

- Nagai Y, Critchley HD, Featherstone E, Fenwick PBC, Trimble MR, Dolan RJ (2001) Brain activity relating to the contingent negative variation: an fMRI investigation. *NeuroImage*, 21: 1232-1241.
- Nardone A, Schieppati M (1988) Postural adjustments associated with voluntary contractions of leg muscles in standing man. *Experimental Brain Research*, 69: 469-480.
- Nashner LM, MacCollum G (1985) The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behavioral & Brain Sciences*, 8: 135-150.
- Niemi P, Näätänen R (1981) Foreperiod and simple reaction time. *Psychological Bulletin*, 89: 133-162.
- Noé F, Quaine F (2001) Influence of steep gradient supporting walls in rock climbing: biomechanical analysis. *Gait and Posture*, 13: 86-94.
- Nougier V, Teasdale N, Bard C, Fleury C (1999) Modulation of anticipatory postural adjustments in a reactive and a self-triggered mode in humans. *Neuroscience Letters*, 260: 109-112.
- Nouillot P, Bouisset S, Do MC (1992) Do fast voluntary movements necessitate anticipatory postural adjustments even if equilibrium is unstable? *Neuroscience Letters*, 147: 1-4.
- Olivier I, Rival C (2002) Foreperiod duration and motor preparation during childhood. *Neuroscience Letters*, 319: 125-128.
- Orme JE (1962) Time studies in normal and abnormal personalities. *Acta Psychologica*, 20 : 2685-303.
- Paillard J (1971) Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace. *Cahiers de Psychologie*, 14: 231-316.
- Paillard J (1976) Tonus, posture et mouvement. In : C.H. Kayser (Ed.). *Traité de physiologie, Tome 3, Chapitre 6, 3^{ième} édition* (pp. 521-728). Flammarion, Paris.
- Paillard J, Bard C, Fleury M (1989) Synchronizing hand and foot movement in a projective or reactive mode: two contrasting schedules of motor command. *Society for Neuroscience*, abstract, n° 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.
- Pedrocchi A, Baroni G, Mouchnino L, Ferrigno G, Pedotti A, Massion J (2002) Absence of center of mass control for leg abduction in long-term weightlessness in humans. *Neuroscience Letters*, 319: 172-176
- Penfield W, Rasmussen T (1950) The cerebral cortex of man: A Clinical Study of Localization of Function. Macmillan. New York.
- Philipova D, Papivanov D, Georgieva S, Tchukanova R (2001) Slow brain potentials associated with motor preparation and stimulus anticipation. *Acta Physiologica and pharmacologica Bulgarica*, 26, 107-110.
- Plamondon R, Alimi AM (1997) Speed-accuracy trade-offs in target-directed movements. *Behavioral Brain Sciences*, 20: 1-21.
- Posner MI, Boies S (1971) Components of attention. *Psychological Review*, 78(5): 391-408.
- Posner MI, Snyder CRR (1975) Facilitation and inhibition in the processing of signals. In: P.M.A. Rabitt & S. Dornic (Eds.). *Attention and Performance V* (pp 669-682). Londres: Academic Press.
- Ramos CF, Stark LW (1990) Postural maintenance during fast forward bending: a model simulation experiment determinesthe “reduced trajectory”. *Experimental Brain Research*, 82: 651-657.
- Rebert CS, McAdam DW, Knott JR, Irwin DA (1967) Slow potential change in human brain related to level of motivation. *J. Comp. Physiol. Psychol.*, 63: 20-23.
- Redfern MS, Jennings JR, Martin C, Furnam JM (2001) Attention influences sensory integration for postural control in older adults. *Gait and Posture*, 14: 211-216.
- Requin J (1978) Spécificité des ajustements préparatoires à l'exécution du programme moteur. In: H. Hecaen & M. Jeannerod (Eds.), *Du contrôle moteur à l'organisation du geste* (pp. 84-129). Masson. Paris.

- Requin J, Brener J, Ring C (1991) Preparation for action. In: J. Jennings & M.G.H. Coles (Eds.), *Handbook of cognitive psychophysiology: central and autonomic nervous system approaches* (pp. 357-448). John. New York.
- Riach CL, Hayes KC (1987) Maturation of postural sway in young children. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 29: 650-658.
- Rihet P, Possamaï CA, Micallef-Roll J, Blin O, Hasbroucq T (2002) Dopamine and human information processing : a reaction time analysis to the effect of levodopa in healthy subjects. *Psychopharmacology*, 163: 62–67.
- Rogers MW, Kukulka CG, Soderberg GL (1992) Age related changes in postural responses preceding rapid self-paced and reaction time arm movements. *Journal of Gerontology*, 47: M159-M165.
- Rogers MW, Pai YC (1990) Dynamic transitions in stance support accompanying leg flexion movements in man. *Experimental Brain Research*, 81: 398-384.
- Roll JP, Roll R (1988) Extraocular proprioception and body postural references. In : V .S. Gurfinkel, M.E. Ioffe, J. Massion & J.P. Roll (Eds.), *Stance and motion : facts and concepts* (pp. 23-26). New York: Plenum Press.
- Rosenbaum DA (1980) Human movement initiation: specification of arm, direction and extent. *Journal of Experimental Psychology*, 109(4): 444-474.
- Rosenbaum DA, Kornblum S (1982) A priming method for investigating the selection of motor responses. *Acta Psychologica*, 51: 223-243.
- Salthouse TA (1985) Speed of behaviour and its applications for cognition. In: J.E. Birren & K.W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of Aging* (pp. 400-426), Van Nostrand Reinhold, New York.
- Sanders AF (1979) Some effect of instructed muscle tension on choice reaction time and movement time. In: R.S. Nickerson (Ed.), *Attention and Performance VIII*, Erlbaum, Hillsdale, N.J.
- Sanders AF (1980) Stage analysis of reaction processes. In: G.E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 331-354), Amsterdam, North-Holland.

- Sanders AF (1983) Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, 53: 64-97.
- Sanders AF (1990) Issues and trends in the debate on discrete vs. Continuous processing of information. *Acta Psychologica*, 74: 123-167.
- Schmidt RA (1975) A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review* 82: 225-260.
- Schmidt RA (1988) Motor and action perspectives on motor behavior. In: O.G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex Movement Behavior : The motor action Controversy* (pp. 3-44). Amsterdam: North-Holland.
- Shannon CE, Weaver W (1949) The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press.
- Shapiro DC, Schmidt RA (1981) The schema theory: recent evidence and developmental implications. In J.A.S Skelso & J.E Klark (Eds.) *The Development of Movement Control and Coordination* (pp. 113-150). New York: Wiley.
- Shapiro DC, zernicke RF, Gregor RJ, Diestel JD (1981) Evidence for generalized motor programs using gait pattern analysis. *Journal of motor behavior*, 13: 33-47.
- Sheridan MR (1981) Response programming and reaction time. *Journal of Motor Behavior*, 13: 161-176.
- Sherrington (1906) The integrative action of the nervous system (Fits ed. (2nd Ed. 1947)). New Haven. Yale University Press.
- Shiratori T, Latash ML (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 ML (2001) Anticipatory postural adjustments during load catching in standing subjects. *Clinical Neurophysiology*, 112: 1250-1265.
- Slijper H, Latash ML (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 ML, Mordkoff JT (2002) Anticipatory postural adjustments under simple and Choice reaction time conditions. *Brain Research*, 924: 184-197.
- Smith EE (1968) Choice reaction time: Analysis of the major theoretical positions. *Psychological Bulletin*, 69(2): 77-110.
- Smith AM, Massion M, Gahéry Y, Roumieu J (1978) Unitary activity of ventrolateral nucleus during placing movement and associated postural adjustment. *Brain Research*, 149: 329-346.
- Spijkers WAC, Walter A (1985) Response processing stages in choice reactions. *Acta Psychologica*, 58: 191-204.
- Soechting JF, Laquaniti F (1981) Invariant characteristics of pointing movement in man. *The Journal of Neuroscience*, 1(7): 710-720.
- Stapley P, Pozzo T, Grishin A (1998) The role of anticipatory postural adjustments during whole body forward reaching movements. *Neuroreport*, 9: 395-401.
- Stelmach GE, Amrhein PC, Goggin NL (1988) Age differences in bimanual coordination. *Journal of Gerontology*, 43: 18-23.
- Stelmach GE, Goggin NL, Garcia-Colera A (1987) Movement specification time with age. *Experimental Aging Research*, 13: 39-46.
- Stelmach GE, Populin L, Müller F (1990) Postural muscle onset and voluntary movement in the elderly. *Neuroscience Letters*, 117: 188-193.
- Sternberg S (1969) The discovery of processing stages : Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30. *Attention and performance II*, 276-315.
- Strauss ME, Wagman AM, Quaid KA (1983) Preparatory interval influences on reaction time of elderly adults. *Journal of Gerontology*, 38: 55-57.
- Tandonnet C, Burle B, Vidal F, Hasbroucq T (2003) The influence of time preparation on motor processes assessed by surface Laplacien estimation. *Clinical Neurophysiology*, 114: 2376-2384.

- Teasdale N, Bard C, Larue J, Fleury M (1993) On the cognitive penetrability of posture control. *Experimental Aging Research*, 19: 1-13.
- Teyssèdre C, Lino F, Zattara M, Bouisset S (2000) Anticipatory EMG patterns associated with preferred and nonpreferred pointing arm movements. *Experimental Brain Research*, 134: 435-440.
- Theios J (1975) The components of response latency in human information processing tasks. In: P.M.A. Rabitt & S. Dornic (Eds.). *Attention and Performance* (pp. 43-85). Londres : Academic Press.
- Thomas A (1940) *Equilibre et équilibration*. Masson, Paris.
- Thorstensson A, Oddsson L, Carlson H (1985) Motor control of voluntary trunk movements in standing. *Acta Psychologica Scandinavica*, 125: 309-321.
- Touge T, Taylor LJ, Rothwell JC, Day DL, Thompson PD & Marsden CD (1993) Changes of motor corticalexcitability during the warning period of a reaction time task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 87: S125.
- Toussaint HM, Michies YM, Faber MN, Commissaris DA, van Dieen JH (1998) Scaling anticipatory postural adjustment dependent on confidence of load estimation in a bi-manual whole-body lifting task *Experimental Brain Research*, 120: 85-94.
- Van der Fits IBM, Klip AWJ, Van Eykern LA (1998) Postural adjustments accompanying fast pointing movements in standing, sitting, and lying adults. *Experimental Brain Research*, 120: 202-216.
- Van der Lubbe RH, Los SA, Jaskowski P, Verleger R (2004) Being prepared on time: on the importance of previous foreperiod to current preparation, as reflected in speed, force and preparation-related brain potentials. *Acta Psychologica*, 116: 245-262.
- Vernazza-Martin S, Martin N, Massion J (2000) Kinematic synergy adaptation to microgravity during forward trunk movement. *Journal of Neurophysiology*, 83: 453-464.
- Viviani P, Terzuolo C (1980) Space time invariance in learned motor skills. In: G.E Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior*. Amsterdam. North-Holland Publishing Compagny.

- Vuillerme N, Nougier V (2004) Attentional demand for regulating postural sway : The effect of expertise in gymnastics. *Brain Research Bulletin*, 63: 161-165.
- Wadman WJ, Denier van der Gon JJ, Geuze RH, Mol CR (1979) Control of fast goal-directed arm movements. *Journal of Human Movement Studies*, 5: 3-17.
- Weiss AD (1965) The locus of reaction time change with set, motivation and age. *Journal of Gerontology*, 20: 60-64.
- Welford AT (1952) The psychological refractory period's and the timing of high-speed performance. A review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43: 2-19.
- Welford AT (1976) *Skilled performance : Perceptual and motor skills*. Glenview (Ill.) : Scott Foresman.
- Welford AT (1984) Between bodily changes and performance: some possible reasons for slowing with age. *Experimental Brain Research*, 10: 73-88.
- Wing AM, Nimmo-Smith MI, Eldridge MA (1983) The consistency of cursive letter formation as a function of position in the word. *Acta psychologica*, 54: 197-204.
- Winter DA (1995) Human balance and posture control during standing and walking. *Gait and Posture*, 3: 193-214.
- Woodrow JC (1914) The measurement of attention. *Psychol. Monogram*, 76: 5-17.
- Woollacott MH (1993) Age-related changes in posture and movement. *Journal of Gerontology*, 48: 56-60.
- Woollacott MH, Bonnet M, Yabe K (1984) Preparatory process for anticipatory postural adjustments: modulation of leg muscles reflex pathways during preparation for arm movements in standing man. *Experimental Brain Research*, 55: 263-271.
- Woollacott MH, Inglis B, Manchester D (1988) Response preparation and posture control in the older adult. In: J. Joseph (Ed.), Central determinants of age of age related declines in motor function. New York: New York Academy of Sciences.

- Woollacott MH, Manchester D (1993) Anticipatory postural adjustments in older adults: Are changes in response characteristics due to change in strategy? *Journal of Gerontology*, 48: M64-M70.
- Woollacott MH, Shumway-Cook A (2002) Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait and Posture*, 16: 1-14.
- Wundt W (1886) *Eléments de psychologie expérimentale*. Paris: Alcan.
- Yardley L, Gardner M, Bronstein A, Davies R, Buckwell D, Luxon L (2001) Interference between postural control and mental task performance in patients with vestibular disorder and healthy controls. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 71: 48-52.
- Yuanhui M, Kasai T (1993) Effects of foreperiod on response latency of different movement patterns. *Perceptual and Motor Skills*, 77: 1160-1162.
- Zacharkow D (1988) *Posture : sitting, standing, chair design and exercise*. Thomas, Springfield, IL.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures:

Cadre théorique

Figure I-1 : Homonculus sensoriel et moteur.....	6
Figure I-2 : Schéma d'Allen et Tsukahara (1974) révisé et complété par Paillard (1982).....	8
Figure I-3 : Principe d'un système en boucle ouverte.	9
Figure I-4 : Principe d'un système en boucle fermée.	10
Figure I-5 : Principe d'un système de contrôle proactif.....	11
Figure I-6 : Décours temporel de la chronométrie mentale.	14
Figure I-7 : Modèle sériel du traitement de l'information.	18
Figure I-8 : Modèle sériel du traitement de l'information.	19
Figure I-9 : Schéma soulignant la position en dérivation des processus de préparation par rapport au Système de Traitement de l'Information (adapté de Requin, 1978).	23
Figure II-1: Les systèmes descendants médian et latéral issus du tronc cérébral.	32
Figure II-2 : Contrôle de la posture.....	35
Figure II-3 : Étapes du modèle simplifié du pendule inversé (d'après Winter, 1995).....	36
Figure II-4 : Classification des ajustements posturaux.	40
Figure II-5 : Deux modes de coordination entre la posture et le mouvement (adaptée de Gahéry et Massion, 1981 et Massion 1992).	51

Expérience I

Figure III-1 : Illustration du matériel et de la procédure utilisés.	64
Figure III-2 : Déplacement antéro-postérieur du CP sur une fenêtre de -300 à +700 t ₀ lors d'une tâche d'élévation de bras.....	67
Figure III-3 : Évolution du temps prémoteur (ms) en fonction de la durée de la PP et de la condition posturale.	69
Figure III-4 : Identification de la latence des APAs au niveau du TFLc en fonction de la durée de la PP.	70
Figure III-5 : Variables issues du déplacement du CP en fonction de la durée de la PP.	71
Figure III-6 : Corrélations entre le temps prémoteur et 1) le début de l'activité du TFLc et 2) le début du déplacement du CP grâce à la variable INICP _x	72

Expérience II

Figure IV-1: Illustration du matériel et de la procédure utilisés.	80
Figure IV-2 : Illustration des valeurs mesurées sur le moment vertical T _z lors de l'élévation du bras droit.	83
Figure IV-3 : Illustration des tracés EMGs des muscles posturaux lors de l'élévation du bras droit en fonction de la condition posturale.	85
Figure IV-4 : Intégration de l'activité basale et de l'activité nette des différents muscles posturaux.....	86
Figure IV-5 : Pourcentage du temps passé à l'intérieur de 10 anneaux concentriques.	87
Figure IV-6 : Évolution du temps prémoteur en fonction de la condition posturale et de la PP.	88
Figure IV-7 : Début d'activation des muscles posturaux par rapport à t ₀ , en fonction de la PP.	88

Expérience III

Figure V-1: Illustration du matériel utilisé.....	97
Figure V-2 : Illustration de la procédure expérimentale.	99
Figure V-3 : Déplacement du CP en fonction de la présence du délestage et de la nature de la préparation.....	102
Figure V-4 : Accélération du bras en fonction de la présence du délestage et de la nature de la préparation chez un sujet représentatif.	104
Figure V-5 : Illustration de l'interaction entre la condition de perturbation posturale et les muscles posturaux au niveau des EMGs intégrés normalisés (%).	106
Figure V-6 : Illustration de l'interaction entre la condition de perturbation posturale et le niveau de préparation au niveau des EMGs intégrés normalisés (%).	106

Figure V-7 : Séquence d'inhibition des muscles posturaux en fonction de la perturbation posturale et du niveau de la préparation.	107
Figure V-8 : Évolution du TR en fonction de la perturbation posturale et du niveau de la préparation.	109
Figure V-9 : Déplacement du CP (mm) en fonction de la durée de la PP.	111
Figure V-10 : Accélération du bras (m/s ²) en fonction de la PP et du niveau de la préparation.	112
Figure V-11 : Évolution de l'activité EMG intégrée en fonction de la durée de la PP.	113
Figure V-12 : Évolution du TR en fonction de la durée de la PP et du niveau de la préparation.....	113

Expérience IV

Figure VI-1: Illustration du matériel et de la procédure utilisées.	123
Figure VI-2 : Illustration du protocole d'allumage des LEDs.	125
Figure VI-3 : Déplacement antéro-postérieur du CP sur une fenêtre de -400 à +1100 t ₀ lors d'un essai concernant une tâche d'élévation du bras droit.	127
Figure VI-4 : Illustration des variables calculées sur le moment vertical.....	127
Figure VI-5 : Effet de la PP sur le TR en fonction de l'âge et de la condition posturale lors d'une préparation Valide.....	129
Figure VI-6 : Interaction âge × durée de la PP sur le temps d'accélération de l'élévation du bras.....	130
Figure VI-7 : Interaction âge × durée de la PP sur le déplacement maximal arrière du CP lors d'une élévation d'un bras dans la condition <i>Debout</i>	132
Figure VI-8 : Illustration du moment vertical en fonction de la condition de préparation.....	134

Discussion générale

Figure VII-1 : Modèle des processus psychologique et neurophysiologique impliqués dans la préparation et l'initiation des ajustements posturaux anticipés (Adapté de Woollacott et al., 1984).....	151
Figure VII-2 : Effets des contraintes posturale et focale sur la coordination ente la posture te le mouvement (Adapté de Woollacott et al., 1984)	153

Tableaux:

Tableau I-1 : Localisation de l'effet de la durée de la période préparatoire dans la chaîne de traitement (adapté de Sanders, 1980, p. 342).	20
Tableau IV-1 : Récapitulatifs des valeurs calculés sur le moment vertical en fonction de la PP.....	89
Tableau V-1 : Récapitulatif des Coefficients de corrélation entre les différentes valeurs.	105

Equations:

$R_p - W_g = I\alpha$ Équation 1	37
$\Delta CP_y = \Delta M_x / F_z$ Équation 2.....	66
$\int EMG = \int EMG_{total} - 4 * \int EMG_{b(50)}$ Équation 3	82
$T_z = M_z + \Delta CP_y \cdot F_x - \Delta CP_x \cdot F_y$ Équation 4	83
$\int EMG_{myo} = \int EMG_{total} / \int EMG_{b(150)} \cdot 100$ Équation 5	100

ÉTUDE DES PROCESSUS PRÉPARATOIRES IMPLIQUÉS DANS LA COORDINATION POSTURE/MOUVEMENT

Effets de la période préparatoire sur les ajustements posturaux anticipés

Résumé

L'accomplissement d'un mouvement volontaire suppose la mise en jeu de processus de préparation qui prédéterminent l'efficacité du comportement moteur. Cette préparation motrice peut être dépendante de l'incertitude temporelle et/ou événementielle prise en compte par le système nerveux central en vue de réaliser l'acte moteur. Cependant, cette activité motrice intentionnelle est confrontée à deux exigences apparemment contradictoires qui sont d'une part, le mouvement de certains segments corporels orientés vers un but et d'autres part la stabilisation des autres segments du corps afin de maintenir l'équilibre et une posture adéquate pour la réalisation de la tâche. Ce travail vise à croiser les données issues du champ de la chronométrie mentale avec celles issues du domaine du contrôle postural en vue de mettre en évidence l'impact de la préparation motrice sur la coordination entre la posture et le mouvement. La recherche présentée ici a pour ambition de modifier la qualité de la préparation motrice afin 1) de montrer que la coordination posture/mouvement est dépendante du processus de préparation, et 2) d'évaluer cette préparation au regard des effets des différentes incertitudes temporelles et événementielles sur les ajustements posturaux anticipés (APAs).

Pour ce faire, nous avons manipulé la durée de la période préparatoire (temps séparant un signal préparatoire d'un signal impératif), sa nature ainsi que les informations mises à disposition durant ce laps de temps afin d'exercer différentes contraintes de préparation. Une série d'expériences a été menée de façon à, dans un premier temps, identifier une période préparatoire optimale lorsqu'un mouvement entraîne par la suite une perturbation posturale et dans un deuxième temps, à modifier cet état de préparation en vue de dégager certaines caractéristiques dans la coordination posture/mouvement. Ainsi, nous avons démontré que la configuration posturale dans laquelle le mouvement est exécuté nécessite un temps de préparation plus important. Au fil des expériences, il apparaît que le SNC est capable de programmer les APAs durant la période préparatoire. Cependant, cette préparation doit tenir compte de deux facteurs influençant différemment les APAs. La réduction de l'incertitude événementielle durant la période préparatoire conduirait à augmenter les APAs et la stabilité posturale tandis que la réduction de l'incertitude temporelle sur le moment d'apparition du signal impératif tendrait à les diminuer, retardant ainsi l'apparition de la commande posturale.

Ainsi, ce travail doctoral supporte l'idée que la composante posturale d'une tâche posturo-cinétique est dépendante d'une certaine préparation. Cette dernière l'influence grâce aux différents impacts dont elle dispose sur le système de traitement de l'information.

Mots-clefs : Chronométrie mentale ; Préparation motrice ; Ajustements posturaux anticipés ;
Interaction posture/mouvement, Personnes âgées.