

UNIVERSITE DE POITIERS - FACULTE DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire d'Analyse de la Performance Motrice Humaine

(Equipe : Performance, Motricité et Cognition)

Ecole Doctorale Sciences Humaines Sociales

ETUDE ET LOCALISATION DE L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR UN EXERCICE PHYSIQUE SOUS-MAXIMAL AU NIVEAU DE LA CHAINE DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION SENSORIMOTRICE

Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers

Présentée par Karen DAVRANCHE

Sous la direction du professeur Michel AUDIFFREN

Membres du jury :

Thierry HASBROUCQ, Directeur de Recherches au CNRS de Marseille (France)

Professeur Jeanick BRISSWALTER, Université de Toulon et du Var (France)

Professeur Maurits VAN DER MOLEN, Université d'Amsterdam (Pays-Bas)

Professeur Yannick BLANDIN, Université de Poitiers (France)

Professeur Michel AUDIFFREN, Université de Poitiers (France)

Rapporteurs :

Thierry HASBROUCQ, Directeur de Recherches au CNRS de Marseille

Professeur Jeanick BRISSWALTER, Université de Toulon et du Var

24 Novembre 2003

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le professeur Michel Audiffren pour avoir encadré ce travail de thèse malgré un emploi du temps chargé et un grand nombre de responsabilités, et pour m'avoir permis de bénéficier de ses compétences et de ses conseils méthodologiques et théoriques.

Je souhaite également témoigner ma reconnaissance aux rapporteurs et aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail de recherche.

Mes remerciements s'adressent également aux deux équipes du LAPMH, chercheurs et étudiants ainsi qu'à Nathalie André pour avoir contribué, à différents titres, à l'avancée de ce travail.

Je remercie du fond du cœur les chercheurs du CNRS de Marseille pour leur accueil généreux et chaleureux au sein de leur laboratoire (LNC) et plus particulièrement Borís, Thierry et Jean-Luc.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel du Service d'Explorations Fonctionnelles Respiratoires du Centre Hospitalier Universitaire de Poitiers, et plus spécialement le Dr André Denjean pour m'avoir autorisé à travailler dans son service hospitalier.

Merci à Christian Hubert (IUT Poitiers) et Guy Reynard (CNRS Marseille) pour leurs assistances techniques souvent dans l'urgence.

Merci à Jacques Lehouezec (Pharmacia Upjohn) pour son assistance matérielle et pour l'intérêt qu'il porte à ce travail depuis déjà plusieurs années.

J'adresse également un grand merci à Nelly Berneron, Walter Agostini et François Debien pour leur gentillesse, leur générosité et leur professionnalisme de tous les jours.

Enfin, je remercie l'ensemble des sujets qui ont accepté de participer à ces différents protocoles expérimentaux avec générosité et bonne humeur malgré leur charge d'entraînement (Handballeurs et Basketteurs de Poitiers), de travail (étudiants) et leurs responsabilités professionnelles (Sapeurs pompiers de Poitiers).

“ [...] **Toute ma jeunesse, j’ai voulu dire JE SAIS**
Seulement, plus je cherchais, et puis moins j’savais

Il y 30 coups qui ont sonné à l’horloge
Je suis encore à ma fenêtre, je regarde, et je m’interroge ?

Maintenant JE SAIS, JE SAIS QU’ON NE SAIT JAMAIS !

La vie, l’amour, l’argent, les amis et les roses
On ne sait jamais le bruit ni la couleur des choses
C’est tout ce que je sais ! Mais ça, j’le SAIS... ! ”

Jean Gabin (Maintenant je sais, 1974)

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	p. 1
<hr/>	
PREMIERE PARTIE	p. 3
<hr/>	
I. EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR UN EXERCICE SOUS-MAXIMAL	p. 4
Facteurs méthodologiques fondamentaux	p. 4
<i>Intensité et durée de l'exercice</i>	p. 4
<i>Expertise cognitive des sujets</i>	p. 5
<i>Caractéristiques de la tâche cognitive</i>	p. 6
<i>Moment de passation de la tâche cognitive</i>	p. 6
Synthèse des principaux résultats expérimentaux	p. 6
Arguments physiologiques et électrophysiologiques	p. 8
Tâche de temps de réaction de choix versus temps de réaction simple	p. 11
II. EPREUVE D'EFFORT ET NOTION DE SEUILS VENTILATOIRES	p. 14
Définitions des seuils ventilatoires	p. 14
Utilisation expérimentale des seuils ventilatoires	p. 15
Protocole d'effort maximal	p. 16
<i>Indices physiologiques utilisés</i>	p. 16
<i>Caractéristiques des différentes épreuves d'effort</i>	p. 17
III. PARADIGME DE LA CHRONOMETRIE MENTALE	p. 19
Principe	p. 19
Procédure de temps de réaction	p. 20
Compromis vitesse-précision	p. 21

SOMMAIRE

IV. METHODE DES FACTEURS ADDITIFS	p. 23
Définition	p. 23
Logique d'inférence	p. 23
Influence sélective des facteurs expérimentaux	p. 25
<i>L'intensité d'un signal</i>	p. 25
<i>La qualité du signal</i>	p. 26
<i>La compatibilité stimulus-réponse</i>	p. 26
<i>L'incertitude temporelle</i>	p. 26
Limites de l'utilisation de la Méthode des Facteurs Additifs	p. 26
V. MODELE COGNITIVO-ENERGETIQUE DU STRESS ET DE LA PERFORMANCE	p. 29
VI. ANALYSE DE DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION	p. 33
Définition	p. 33
Techniques d'analyse des distributions de temps de réaction	p. 34
<i>Ajustement de fonctions de probabilité théorique</i>	p. 34
<i>Technique de 'vincentisation'</i>	p. 35
Représentations graphiques des distributions	p. 37
VII. TECHNIQUE ELECTROMYOGRAPHIQUE ET LOGIQUES D'INFERENCE	p. 39
Définition	p. 39
Logiques d'inférence	p. 39
Technique d'indexation	p. 41
Analyse de la forme du tracé électromyographique	p. 45
Principaux résultats expérimentaux	p. 47

SOMMAIRE

VII. ORIENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE	p. 49
--	-------

DEUXIEME PARTIE – EXPERIMENTALE	p. 51
--	-------

EXPERIENCE PRELIMINAIRE : VALIDATION TRANSCULTURELLE DU QUESTIONNAIRE DE BOND ET LADER (1974)	p. 52
--	-------

INTRODUCTION	p. 52
---------------------	-------

ETAPE 1 : ETABLISSEMENT ET EVALUATION DE LA VERSION PRELIMINAIRE	p. 55
---	-------

PROTOCOLE 1.1	p. 55
----------------------	-------

<i>Sujets</i>	p. 55
---------------	-------

<i>Procédure</i>	p. 55
------------------	-------

<i>Résultats et discussion</i>	p. 55
--------------------------------	-------

PROTOCOLE 1.2	p. 57
----------------------	-------

<i>Sujets</i>	p. 57
---------------	-------

<i>Discussion</i>	p. 57
-------------------	-------

PROTOCOLE 1.3	p. 57
----------------------	-------

<i>Sujets</i>	p. 57
---------------	-------

<i>Procédure</i>	p. 58
------------------	-------

<i>Résultats et discussion</i>	p. 58
--------------------------------	-------

ETAPE 2 : ANALYSES DE LA STRUCTURE FACTORIELLE	p. 59
---	-------

<i>Sujets</i>	p. 59
---------------	-------

<i>Procédure</i>	p. 60
------------------	-------

<i>Résultats et discussion</i>	p. 60
--------------------------------	-------

ETAPE 3 : VALIDITE DE CONSTRUIT DU QUESTIONNAIRE	p. 63
---	-------

<i>Résultats et discussion</i>	p. 63
--------------------------------	-------

SOMMAIRE

CONCLUSION	p. 64
EXPERIENCE 1 : APPLICATION DE LA METHODE DES FACTEURS ADDITIFS A L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR L'EXERCICE	p. 65
INTRODUCTION	p. 65
METHODE	p. 69
SELECTION DES SUJETS	p. 69
SUJETS	p. 70
TACHE ET APPAREILLAGE	p. 71
<i>Tâche de temps de réaction de choix</i>	p. 71
<i>Epreuve de double tâche</i>	p. 74
<i>Questionnaires d'état d'humeur et d'évaluation de sensations subjectives</i>	p. 74
<i>Echelles d'évaluation de la difficulté perçue</i>	p. 75
<i>Fréquence Critique de Fusion (FCF)</i>	p. 76
PROCEDURE	p. 76
TRAITEMENT DES DONNEES	p. 79
<i>Variables chronométriques</i>	p. 79
<i>Taux d'erreurs de décision</i>	p. 80
<i>Fréquence Critique de Fusion</i>	p. 80
<i>Questionnaires d'état d'humeur et d'évaluation de sensations subjectives</i>	p. 81
<i>Fréquence cardiaque et fréquence de pédalage</i>	p. 81
RESULTATS	p. 82
STATISTIQUES	p. 82
FREQUENCE CARDIAQUE, FREQUENCE DE PEDALAGE ET DIFFICULTE PERÇUE	p. 83
QUALITE DU SIGNAL, COMPATIBILITE STIMULUS-REPONSE ET INCERTITUDE TEMPORELLE	p. 85

SOMMAIRE

FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION ET QUESTIONNAIRES DE SENSATIONS SUBJECTIVES	p. 88
ECHANGE VITESSE-PRECISION	p. 90
EFFET DE L'EXERCICE	p. 91
DISCUSSION	p. 91
PRE-REQUIS DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	p. 92
EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE	p. 92
EFFETS DE FACILITATION DES PERFORMANCES COGNITIVES	p. 93
EFFETS DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION	p. 95
EFFETS DE L'EXERCICE SUR L'ETAT D'HUMEUR SUBJECTIF	p. 96
LOCALISATION DE L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR L'EXERCICE	p. 96
EXPERIENCE 2 : EFFET DE L'EXERCICE SUR LES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION ET INFLUENCE DU TEMPS PASSE SUR LA TACHE	p. 99
INTRODUCTION	p. 99
METHODE	p. 101
SUJETS	p. 101
TACHE ET APPAREILLAGE	p. 102
<i>Tâche de temps de réaction de choix</i>	p. 102
<i>Epreuve de double tâche</i>	p. 102
<i>Fréquence Critique de Fusion (FCF)</i>	p. 103
PROCEDURE	p. 103
TRAITEMENT DES DONNEES	p. 104

SOMMAIRE

<i>Variables chronométriques et taux d'erreurs de décision</i>	p. 104
<i>Distributions de temps de réaction</i>	p. 105
RESULTATS	p. 105
STATISTIQUES	p. 105
FREQUENCE CARDIAQUE ET FREQUENCE DE PEDALAGE	p. 106
EFFET DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION	p. 106
EFFET DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION, LA VARIANCE DU TEMPS DE REACTION ET LE TAUX D'ERREURS DE DECISION	p. 107
EFFET DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION ET SUR LE TAUX D'ERREURS DE DECISION EN FONCTION DU TEMPS PASSE SUR LA TACHE	p. 108
EFFET DE L'EXERCICE SUR LES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION	p. 110
DISCUSSION	p. 111
EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE	p. 111
EFFETS DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION	p. 111
EFFETS DE FACILITATION DES PERFORMANCES COGNITIVES	p. 112
NATURE DE L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR L'EXERCICE	p. 113
 EXPERIENCE 3 : LOCALISATION DE L'EFFET D'UN EXERCICE AU COURS D'UNE TACHE DE TEMPS DE REACTION DE CHOIX : UNE ETUDE ELECTROMYOGRAPHIQUE	 p. 115
INTRODUCTION	p. 115
METHODE	p. 117
SUJETS	p. 117
TACHES ET APPAREILLAGE	p. 118

SOMMAIRE

<i>Tâche de temps de réaction de choix</i>	p. 118
<i>Epreuve de double tâche</i>	p. 119
<i>Fréquence Critique de Fusion</i>	p. 120
<i>Mesures électromyographiques</i>	p. 120
PROCEDURE	p. 120
TRAITEMENT DES DONNEES	p. 122
<i>Traitement des données électromyographiques</i>	p. 122
<i>Variables chronométriques et taux d'erreurs de décision</i>	p. 123
<i>Distributions de temps de réaction</i>	p. 123
RESULTATS	p. 124
STATISTIQUES	p. 124
FREQUENCE CARDIAQUE ET FREQUENCE DE PEDALAGE	p. 124
EFFET DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION	p. 125
TAUX D'ERREURS DE DECISION	p. 126
EFFET DE L'EXERCICE ET DE L'INTENSITE DU SIGNAL SUR LES DIFFERENTES VARIABLES CHRONOMETRIQUES	p. 126
<i>Temps de réaction</i>	p. 126
<i>Temps Pré-moteur</i>	p. 127
<i>Temps Moteur</i>	p. 128
ANALYSE DES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION	p. 129
<i>Temps de réaction</i>	p. 129
<i>Temps Pré-moteur</i>	p. 130
<i>Temps Moteur</i>	p. 131
EFFET DE L'EXERCICE SUR LA FORME DU SIGNAL ELECTROMYOGRAPHIQUE	p. 132
<i>Pente ascendante des tracés électromyographiques</i>	p. 133
<i>Surface sous les tracés électromyographiques</i>	p. 133
DISCUSSION	p. 134
EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE	p. 135

SOMMAIRE

EFFETS DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION	p. 135
EFFETS DE L'INTENSITE DU SIGNAL	p. 136
EFFETS DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION	p. 136
ANALYSE DE LA FORME DU TRACE ELECTROMYOGRAPHIQUE	p. 137
EXPERIENCE 4 : LOCALISATION DE L'EFFET D'UN EXERCICE AU COURS D'UNE TACHE DE TEMPS DE REACTION SIMPLE : UNE ETUDE ELECTROMYOGRAPHIQUE	p. 140
INTRODUCTION	p. 140
METHODE	p. 141
SUJETS	p. 143
TACHES ET APPAREILLAGE	p. 143
<i>Tâche de temps de réaction simple</i>	p. 143
<i>Epreuve de double tâche et mesures électromyographiques</i>	p. 144
PROCEDURE ET TRAITEMENT DES DONNEES	p. 145
RESULTATS	p. 145
STATISTIQUES	p. 145
FREQUENCE CARDIAQUE ET FREQUENCE DE PEDALAGE	p. 145
TAUX D'ERREURS	p. 147
EFFET DE L'EXERCICE ET DE L'INTENSITE DU SIGNAL SUR LES DIFFERENTES VARIABLES CHRONOMETRIQUES	p. 147
<i>Temps de réaction</i>	p. 147
<i>Temps Pré-moteur</i>	p. 148
<i>Temps Moteur</i>	p. 148

SOMMAIRE

ANALYSE DES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION	p. 149
<i>Temps de réaction</i>	p. 149
<i>Temps Pré-moteur</i>	p. 151
<i>Temps Moteur</i>	p. 152
EFFET DE L'EXERCICE SUR LA FORME DU SIGNAL ELECTROMYOGRAPHIQUE	p. 153
<i>Pente ascendante des tracés électromyographiques</i>	p. 153
<i>Surface sous les tracés électromyographiques</i>	p. 154
DISCUSSION	p. 156
EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE	p. 156
EFFETS DE L'INTENSITE DU SIGNAL	p. 156
EFFETS DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION ET L'ACTIVITE ELECTROMYOGRAPHIQUE	p. 157
<hr/> TROISIEME PARTIE – DISCUSSION GENERALE <hr/>	p. 159
FACTEURS METHODOLOGIQUES FONDAMENTAUX	p. 160
LIMITES DE LA METHODE DES FACTEURS ADDITIFS ET INTERET DE LA TECHNIQUE ELECTROMYOGRAPHIQUE	p. 161
LIMITES DE L'INTERPRETATION DES ANALYSES DE DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION	p. 164
LOCALISATION DE L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR UN EXERCICE	p. 165
PERSPECTIVES	p. 166
BIBLIOGRAPHIE	p. 167
ANNEXES	p. 177

FIGURES

- Figure 1.** p. 5
Evolution de la consommation d'oxygène ($\dot{V}CO_2$) au cours d'un exercice de charge constante sur bicyclette ergométrique réalisé à une intensité supérieure -●- et inférieure -○- au seuil d'accumulation du lactate (d'après Zoladz & Korzeniewski, 2001).
- Figure 2.** p. 14
Définition des seuils ventilatoires (SV1 : premier seuil ventilatoire, SV2 : deuxième seuil ventilatoire) en fonction de l'évolution des paramètres ventilatoires ($\dot{V}E$: Débit d'oxygène, $\dot{V}E/\dot{V}O_2$: Equivalent respiratoire pour l'oxygène, $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$: Equivalents respiratoires pour le gaz carbonique) en fonction de la puissance mécanique (Watts) (d'après Préfault & Mercier, 1993).
- Figure 3.** p. 19
Représentation schématique de la structure interne du système de traitement de l'information.
- Figure 4.** p. 20
Déroulement d'un essai au cours d'une procédure classique de temps de réaction.
- Figure 5.** p. 22
Courbe théorique de l'échange vitesse-précision en temps de réaction (d'après Pachella, 1974)
- Figure 6.** p. 24
Illustration de la logique des facteurs additifs d'après Sternberg (1969).
- Figure 7.** p. 29
Modèle cognitivo-énergétique du stress et de la performance (Sanders, 1983).
- Figure 8.** p. 32
Modèle cognitivo-énergétique du stress et de la performance (modifié d'après Sanders, 1983).
- Figure 9.** p. 33
Changements équivalents au niveau du temps de réaction moyen résultant soit d'un allongement de la queue de la distribution (B), soit d'un décalage de la distribution (C), et effets compensés (D) (Spieler, Balota & Faust, 2000).
- Figure 10.** p. 35
Fonctions de densité de probabilité (p.d.) de deux distributions normales avec $\mu = 500$ ms et $\sigma = 75$ ms ((a), (b)), de deux distributions exponentielles avec $\tau = 150$ ms (a) et $\tau = 350$ ms (b), et des deux distributions Ex-Gaussiennes de temps de réaction (RT) résultantes (Leth-Steensen, Elbaz & Douglas, 2000).

FIGURES

- Figure 11.** p. 37
Distributions de temps moteur (Possamai, Burle, Osma, & Hasbroucq, 2002).
- Figure 12.** p. 38
Représentations graphiques d'une distribution sous la forme d'une fonction de densité de probabilité ('probability density function) et sous la forme d'une fonction de densité cumulée ('cumulative function') (Cousineau & Larochelle, 1997).
- Figure 13.** p. 40
Tracé électromyographique et fractionnement du Temps de Réaction en deux composantes chronométriques : le Temps Pré-moteur et le Temps Moteur.
- Figure 14.** p. 42
Tracé électromyographique d'un essai '*Incorrect-Correct*' laissant apparaître une activation électromyographique sous-liminaire du muscle impliqué dans la réponse incorrecte (tracé du haut) avant l'activation du muscle impliqué dans la réponse correcte (tracé du bas).
- Figure 15.** p. 44
Tracé électromyographique d'un essai '*Correct-Incorrect*' laissant apparaître une première activation électromyographique du muscle impliqué dans la réponse correcte (tracé du bas), suivie d'une deuxième activation du muscle impliqué dans la réponse incorrecte ne provoquant pas le déclenchement d'une erreur (tracé du haut).
- Figure 16.** p. 44
Tracé électromyographique d'un essai '*Correct-Correct*' laissant apparaître plusieurs activations successives du muscle impliqué dans la réponse correcte.
- Figure 17.** p. 46
Tracé électromyographique et représentation schématique des composantes chronométriques (temps de réaction, temps pré-moteur et temps moteur) et de l'angle α (Possamai *et al.*, 2002).
- Figure 18.** p. 54
Version originale du Mood rating scale 16-100 mm (Bond et Lader, 1974).
- Figure 19.** p. 56
Version expérimentale française du Mood rating scale 16-100 mm (Bond et Lader, 1974).
- Figure 20.** p. 71

FIGURES

Dispositif de temps de réaction de choix.

Figure 21. p. 72

Signaux impératifs de réponse présentés aux sujets.

Figure 22. p. 73

Exemple d'un signal impératif de réponse intact (à gauche) puis dégradé de 4 manières différentes.

Figure 23. p. 73

Exemple d'un type de dégradation appliquée aux différents signaux impératifs de réponse.

Figure 24. p. 78

Répartition du nombre total d'essais de temps de réaction au sein des 2 blocs, en fonction de la manipulation des différents facteurs cognitifs.

Figure 25. p. 79

Déroulement temporel des sessions expérimentales.

Figure 26. p. 84

Evolution de la fréquence cardiaque (bat.min^{-1}) au cours d'un bloc de 20 minutes d'exercice physique en fonction de l'intensité de l'exercice (20 % de PMA -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 27. p. 85

Evolution de la fréquence de pédalage (tr.min^{-1}) au cours d'un bloc de 20 minutes d'exercice en fonction de l'intensité d'exercice (20 % de PMA -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 28. p. 87

Temps de réaction (msec) au repos (-○-) et à 50 % de PMA (-●-) en fonction des différentes modalités des facteurs cognitifs manipulés (de gauche à droite : Qualité du signal, Compatibilité S-R, Période préparatoire).

Figure 29. p. 87

Variance du temps de réaction (msec^2) au repos (-○-) et à 50 % de PMA (-●-) en fonction des différentes modalités des facteurs cognitifs manipulés (de gauche à droite : Qualité du signal, Compatibilité S-R, Période préparatoire).

Figure 30. p. 89

Evolution de la fréquence critique de fusion (FCF en hertz) avec l'exercice (avant exercice versus après exercice) en fonction de l'intensité de la sollicitation (repos -●-, 20% PMA -▲- et 50% PMA -■-).

FIGURES

- Figure 31.** p. 90
Evolution de l'état de vigilance (16-100mm, unités arbitraires, figure pleine) et de l'état de vigueur (POMS-f, unités arbitraires, figure vide) avec l'exercice en fonction de l'intensité de la sollicitation (repos, 20% PMA et 50% PMA).
- Figure 32.** p. 109
Evolution des performances de temps de réaction (msec) au repos (-○-) et à l'exercice (-■-) en fonction du temps passé sur la tâche (* p< .05).
- Figure 33.** p. 109
Evolution du taux d'erreur de décision (%) au repos (-○-) et à l'exercice (-■-) en fonction du temps passé sur la tâche (* p< .05).
- Figure 34.** p. 110
Distribution des temps de réaction (msec) au repos (---) et à l'exercice (—) et indice Delta (msec).
- Figure 35.** p. 119
Déroulement temporel d'un essai lors de la tâche de temps de réaction de choix à 2 éventualités.
- Figure 36.** p. 125
Evolution de la fréquence cardiaque (bat.min⁻¹) au cours de la tâche en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).
- Figure 37.** p. 127
Temps de réaction (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).
- Figure 38.** p. 128
Temps pré-moteur (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).
- Figure 39.** p. 129
Temps moteur (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos versus 50% PMA).
- Figure 40.** p. 130
Distribution des Temps de réaction et indice Delta (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).
- Figure 41.** p. 131

FIGURES

Distribution des Temps Pré-moteur et indice Delta (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 42.

p. 132

Distribution des Temps Moteur et indice Delta (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 43.

p. 134

Représentation graphique des grands moyennages des courbes électromyographiques redressées (non lissées) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos versus 50% PMA) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Figure 44.

p. 146

Evolution de la fréquence cardiaque (bat.min^{-1}) au cours de la tâche en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 45.

p. 148

Temps de réaction (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Figure 46.

p. 149

Temps pré-moteur (msec) en fonction de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Figure 47.

p. 150

Distribution des Temps de réaction (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 48.

p. 151

Distribution des Temps Pré-moteur (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 49.

p. 152

Distribution des Temps Moteur (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Figure 50.

p. 155

Représentation graphique des grands moyennages des courbes électromyographiques redressées (non lissées) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos versus 50% PMA) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

TABLEAUX

- Tableau 1.** p. 48
Tableau récapitulatif des différents résultats mis en évidence par l'intermédiaire de la technique de fractionnement du temps de réaction.
- Tableau 2.** p. 58
Tableau récapitulatif des résultats obtenus aux tests de Student entre les 16 items de la version originale et de la version expérimentale.
- Tableau 3.** p. 60
Résultats de l'analyse en composante principale effectuée sur la version expérimentale française du questionnaire (répartition des items en fonction des différents facteurs et poids factoriels des items).
- Tableau 4.** p. 61
Résultats de l'analyse en composante principale obtenue par Bond et Lader en 1974 (répartition des items en fonction des différents facteurs et poids factoriels des items).
- Tableau 5.** p. 64
Résultats de l'analyse factorielle confirmatoire réalisée sur la structure factorielle de la version française et de la version originale de Bond et Lader (1974).

AVANT PROPOS

Dans de nombreuses activités physiques, les individus sont amenés à gérer simultanément des exigences physiologiques et cognitives. La mise en œuvre de choix tactiques et stratégiques dépend fortement de la capacité qu'ont les pratiquants à traiter rapidement et correctement un grand nombre d'informations, malgré les contraintes physiologiques imposées par la tâche. L'étude des interactions entre les modifications physiologiques, induites par la réalisation d'un exercice physique, et les processus informationnels est particulièrement intéressante car elle constitue une approche scientifique expérimentale pertinente pour toute personne impliquée dans des missions relatives à l'optimisation de performances sportives ou militaires. Aujourd'hui, l'avancée des recherches dans ce domaine d'étude, établit clairement que les performances cognitives d'un individu peuvent être facilitées lors de la réalisation simultanée d'un exercice physique d'intensité sous-maximale. En revanche, malgré un certain nombre d'hypothèses, les mécanismes physiologiques et les processus psychologiques impliqués dans ce phénomène de facilitation restent encore indéterminés. Ainsi, l'objectif de ce travail de recherche est de contribuer à l'avancée des connaissances scientifiques, d'une part, en précisant la nature de cet effet de facilitation des performances cognitives et, d'autre part, en localisant son influence au sein de la chaîne de traitement de l'information.

La particularité de cette thématique de recherche, tient au fait, qu'elle regroupe à la fois des connaissances propres à la physiologie de l'exercice et aux neurosciences cognitives. Il semble important de préciser que la finalité de ce travail n'est pas de tenter d'expliquer le phénomène de facilitation dans son intégralité. Ce travail se limite, en fait, à l'étude des conséquences de la réalisation d'un exercice physique sur le traitement de l'information. Malgré l'intérêt transdisciplinaire des résultats, les hypothèses de travail restent malgré tout principalement axées sur des préoccupations propres aux neurosciences cognitives.

Le problème de l'interaction entre les modifications physiologiques et les processus informationnels, pendant l'exercice, sera abordé à travers le modèle cognitivo-énergétique de Sanders (1983). Les effets concomitants d'un exercice physique sur le traitement de l'information seront étudiés par l'intermédiaire de variables physiologiques (fréquence

cardiaque, fréquence de pédalage), psychologiques (questionnaires de sensations subjectives), psychophysique (fréquence critique de fusion) et électrophysiologique (électromyogramme).

Le plan général de ce mémoire est organisé en trois grandes parties. La première partie, théorique, consiste en une revue de littérature centrée sur les conditions expérimentales les plus propices à l'observation d'un effet de facilitation, ainsi que sur les principales hypothèses explicatives de ce phénomène d'amélioration des performances cognitives. Les principaux modèles théoriques, les méthodes d'inférences et les techniques utilisées au cours de ce travail sont également présentés de façon détaillée dans cette première partie. La deuxième partie de ce mémoire consiste, quant à elle, en un rapport détaillé de l'ensemble des travaux réalisés au cours de mes trois années de thèse. Une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce travail de recherche fait finalement l'objet de la troisième partie de ce mémoire.

PREMIERE PARTIE

I. EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR UN EXERCICE SOUS-MAXIMAL

Facteurs méthodologiques fondamentaux

L'influence de l'exercice physique a largement été étudiée au cours de nombreuses tâches cognitives, mais la diversité des protocoles expérimentaux a longtemps conduit à l'obtention de résultats contradictoires. Ainsi en fonction des méthodes expérimentales utilisées, certains auteurs ont observé des effets d'amélioration des performances cognitives, alors que d'autres ont montré des effets de détérioration ou encore une absence d'effet (pour une revue détaillée voir Brisswalter, Collardeau & Arcelin, 2002 ; McMorris & Graydon, 2000 ; Tomporowski & Ellis, 1986 ; Tomporowski, 2003). Récemment, il a clairement été établi que la mise en place de protocoles standardisés, prenant en compte certains facteurs méthodologiques fondamentaux, permet d'observer une facilitation des performances cognitives au cours de la réalisation d'un exercice physique. On considère que les variables expérimentales susceptibles de modifier le sens ou l'amplitude de cet effet sont : l'intensité et la durée de la sollicitation physiologique, la complexité de la tâche cognitive, les caractéristiques individuelles des sujets, et le moment de passation de cette tâche par rapport à la période d'exercice.

Intensité et durée de l'exercice

D'après les résultats de la littérature, l'intensité d'exercice la plus propice à l'apparition d'un phénomène de facilitation est une intensité sous-maximale (i.e., intensité inférieure à l'intensité d'atteinte de $\dot{V}O_2\text{max}$). De plus, la durée de l'exercice doit être suffisamment longue pour permettre la stabilisation de la fréquence de pédalage, des paramètres cardiaques et ventilatoires et l'enregistrement d'un nombre suffisant de données expérimentales. Dans le cadre d'un exercice sous-maximal modéré, la stabilisation des paramètres ventilatoires est relativement rapide (2 minutes ; Figure 1). Cependant, par rigueur méthodologique une période de stabilisation de 3 à 5 minutes, préalable à l'enregistrement des performances cognitives, a été préférée afin de stabiliser également la fréquence de pédalage et la fréquence cardiaque.

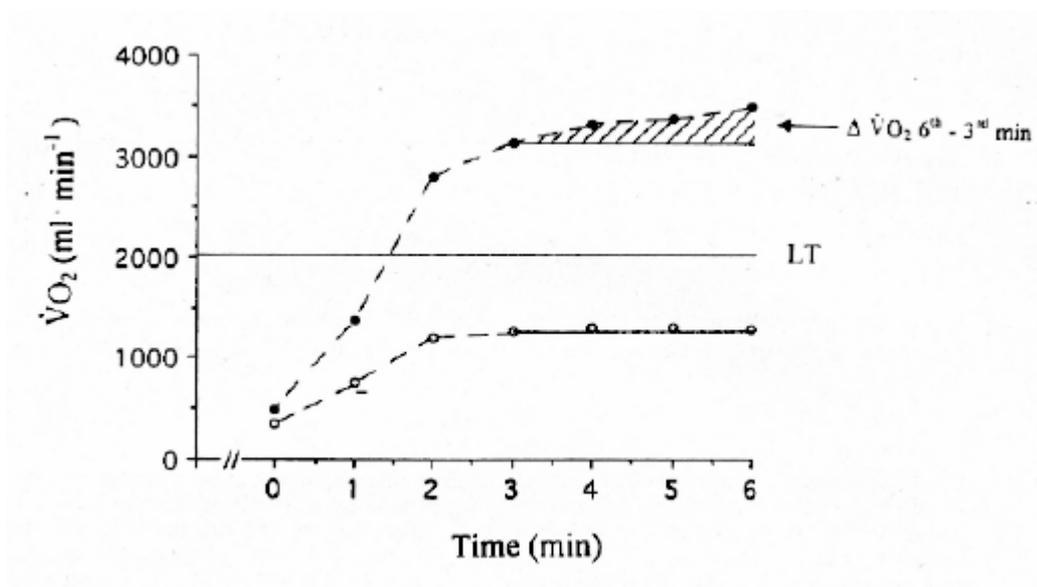


Figure 1. Evolution de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) au cours d'un exercice de charge constante sur bicyclette ergométrique réalisé à une intensité supérieure -●- et inférieure -○- au seuil d'accumulation du lactate (d'après Zoladz & Korzeniewski, 2001).

En revanche, la durée de l'exercice ne doit pas excéder une certaine durée afin de ne pas engendrer de phénomènes de fatigue centrale et périphérique (e.g., 30 minutes à 60% de $\dot{V}O_{2max}$, Fischer, Hollmann & De Meirleir, 1991). La détermination d'intensités relatives de travail, prenant en considération le niveau de condition physique des sujets, est particulièrement recommandée au cours de ce type de protocole expérimental. Ainsi, trois types d'indices physiologiques, déterminés au cours d'un test préliminaire d'effort maximal, sont généralement utilisés : la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), la puissance maximale aérobie (PMA) et les seuils ventilatoires.

Expertise cognitive des sujets

L'analyse de la littérature indique également que l'expertise cognitive des sujets influence les résultats expérimentaux (Delignières, Brisswalter & Legros, 1994a ; McMorris & Graydon, 1996b). L'amélioration des performances cognitives serait plus facilement observable sur une population de sportifs experts en sports de prise de décisions (e.g., sports collectifs, sports de raquettes, sports de combat), que sur des sportifs non-experts, n'étant pas habitués à effectuer des prises de décision en temps limité.

Caractéristiques de la tâche cognitive

Le choix des caractéristiques de la tâche cognitive semble également modifier le sens et l'amplitude de l'effet de l'exercice. En effet, toute chose étant égale par ailleurs, les résultats expérimentaux mettent généralement en évidence une amélioration des performances au cours de tâches complexes et une dégradation au cours de tâches simples (Brisswalter, Arcelin, Audiffren & Delignières, 1997 ; Isaacs & Polhman, 1991 ; McMorris & Keen, 1994). L'interprétation de cette disparité des résultats reste cependant délicate car les processus de traitement mis en œuvre sont sensiblement différents, notamment en fonction de l'incertitude événementielle de la tâche.

Moment de passation de la tâche cognitive

Enfin, le moment de passation de la tâche cognitive induit également des résultats différenciés. Lorsque la mesure des performances cognitives est effectuée immédiatement après l'exercice, l'interprétation des résultats est facilitée car le protocole expérimental ne donne pas lieu à une concurrence attentionnelle entre les tâches physique et cognitive. En revanche, comparativement à une tâche réalisée simultanément à l'exercice, l'effet de facilitation induit par l'exercice est plus difficile à observer. Cette absence d'effet post-exercice suggère que l'organisme retourne rapidement à un état standard dès l'arrêt de l'exercice. Etant donné le caractère transitoire de l'effet d'amélioration, l'utilisation d'un protocole de double tâche semble préférable (moyennant certaines précautions méthodologiques indispensables).

Synthèse des principaux résultats expérimentaux

La prise en considération de l'ensemble de ces recommandations méthodologiques a permis à un certain nombre d'équipes d'observer une amélioration des performances cognitives lors d'un exercice physique. L'existence d'un phénomène de facilitation a plus particulièrement été mise en évidence lors de la réalisation d'une tâche de temps de réaction de choix (TRC) réalisée simultanément à un exercice de pédalage d'intensité sous-maximale (Arcelin, Brisswalter & Delignières, 1997 ; Arcelin, Delignières & Brisswalter, 1998 ; Brisswalter, Legros & Delignières, 1994 ; Chmura, Krysztofiak, Ziembra, Nazar & Kaciuba-

Uscilko, 1998 ; Delignières *et al.*, 1994a ; McMorris & Graydon, 1996a, 1997 ; McMorris, Myers, MacGillivray, Sexsmith, Fallowfield & Forster, 1999 ; Paas & Adam, 1991 ; Yagi, Coburn, Estes & Arruda, 1999).

Dans une première étude, Paas et Adam (1991) ont testé l'influence de l'exercice au cours de protocoles sous-maximaux constant (75% PMA) et fractionné (85 / 40% PMA) de 20 minutes. La phase d'exercice était précédée d'un échauffement de 10 minutes (40% PMA) et suivie d'une période de récupération de 5 minutes (40% PMA). Par rapport aux performances de référence, une diminution significative du temps de réaction (TR) a été observée au cours de l'exercice (\underline{M} = 34 msec), mais également pendant les phases d'échauffement (\underline{M} = 11 msec) et de récupération (\underline{M} = 23 msec).

Dans une étude ultérieure, Brisswalter *et al.* (1994) ont mis en place un protocole expérimental composé de 4 paliers de 6 minutes d'exercice réalisés respectivement à 20, 40, 60 et 80%. A partir de 40% de PMA, l'élévation de l'intensité de l'exercice engendre une diminution du TR. Ces auteurs ont également mis en évidence un effet de la condition physique des sujets sur l'amélioration des performances. En effet, au-delà de 60% de PMA les performances des sujets sans condition physique se stabilisent alors que celles des sujets ayant une bonne condition physique continuent à s'améliorer. Cette diminution du TR, à 60% de PMA, a ensuite été répliquée au cours de deux protocoles expérimentaux réalisés avec une population de sportifs en bonne condition physique (Arcelin *et al.*, 1997, 1998). L'amplitude de l'effet de facilitation, au cours de cet exercice sans contrainte vis-à-vis de la fréquence de pédalage, était de 15 msec dans la première étude et de 16 msec dans la deuxième.

Des résultats différenciés en fonction de l'expertise cognitive des sujets ont également été observés par Delignières *et al.* (1994a) et McMorris et Graydon (1996a). En effet, une amélioration des performances cognitives a uniquement été observée chez des sujets experts en sport de prise de décision (respectivement escrime et football). Cet effet de facilitation apparaît à partir de 20% de PMA au cours d'une tâche de TRC à 2 éventualités (\underline{M} = 13 msec), et entre 40% et 60% de PMA lors de la tâche de TRC à 4 éventualités (\underline{M} = 12 msec) (Delignières *et al.*, 1994a). McMorris et Graydon (1996a, 1997) et McMorris *et al.* (1999) ont également mis en évidence une amélioration du TR à une intensité d'exercice de 70% et de 100% de PMA. Ces résultats suggèrent que ces sujets, habitués à faire face simultanément à des exigences physiques et cognitives, sont capables de gérer le déséquilibre énergétique

engendré par le stress d'un exercice physique, ainsi que l'effet double tâche. En revanche, le traitement de l'information serait moins automatisé chez les sujets non-experts. Le fait que la gestion attentionnelle soit plus coûteuse pourrait en partie expliquer l'observation d'une dégradation des performances (McMorris & Graydon, 1996a). Delignières *et al.* (1994a) suggèrent également que l'effort et les ressources investies dans la tâche sont, d'une part, plus importants chez les sujets experts et d'autre part, que cette différence est d'autant plus marquée que l'intensité d'exercice est importante.

Arguments physiologiques et électrophysiologiques

Les travaux de Chmura *et al.* (1998) et Yagi *et al.* (1999) ont apporté des arguments physiologiques et électrophysiologiques particulièrement utiles à la compréhension de l'effet de facilitation induit par l'exercice physique. Tout d'abord, les résultats de ces deux études confirment une diminution du TR lors de la réalisation d'un exercice d'intensité sous-maximale. L'amélioration des performances, étant associée à une augmentation du taux d'erreurs, une certaine réserve sera tout de même émise vis-à-vis des résultats de Yagi *et al.* (1999). On se reportera au chapitre sur le paradigme de la chronométrie mentale (p.19) quant à la justification de ces réserves.

En effet, Chmura *et al.* (1998) ont mis en évidence une corrélation négative entre le TR et la concentration d'adrénaline et de noradrénaline plasmatique par l'intermédiaire d'un dosage des catécholamines circulantes. Par ailleurs, l'utilisation de la technique des potentiels évoqués cérébraux au cours de l'exercice a permis à Yagi *et al.* (1999) d'observer une diminution de la latence du pic de l'onde P300. Les données physiologiques et électrophysiologiques de ces études (sur lesquelles nous allons revenir en détail dans le paragraphe suivant) sont particulièrement remarquables car elles apportent des arguments expérimentaux forts, en faveur d'une augmentation du niveau d'activation du système nerveux central, due à une libération de catécholamines corticales (principalement adrénaline, noradrénaline, épinéphrine, metanéphrine) (Peyrin, Pequignot, Lacour & Fourcade, 1987).

En fait, il a été clairement établi que l'exercice physique provoque généralement une libération plasmatique de catécholamines par le système sympatho-medullo adrénérique (e.g., Kjaer, 1992 ; Pott, Jensen, Hansen, Christensen, Lassen & Secher, 1996). Deux études,

réalisées chez l'animal, ont également mis en évidence une libération concomitante de catécholamines plasmatiques et corticales au cours d'un exercice (Radosevich, Nash, Brooks Lacy, O'Donovan, Williams & Abumrad, 1989 ; Pagliari & Peyrin, 1995b). Ainsi, on peut penser que l'augmentation du niveau plasmatique de catécholamines induite par l'exercice est concomitante avec une libération corticale de catécholamines.

De plus, les observations de Chmura, Nazar et Kacuiba-Uscilko (1994) et de McMorris *et al.* (1999) apportent également des arguments en faveur de cette hypothèse. En effet, au cours d'une tâche de TRC, de meilleures performances de TR sont observées immédiatement après l'atteinte du seuil d'adrénaline plasmatique (Chmura *et al.*, 1994). Ce résultat suggère, d'une part, que l'apparition d'un effet de facilitation des performances cognitives coïncide avec un accroissement soudain de la libération de catécholamines dans le sang et, d'autre part, que la puissance mécanique atteinte au seuil d'adrénaline plasmatique pourrait s'avérer être un indice pertinent, particulièrement utile dans la détermination d'intensités relatives de travail dans ce type d'études (McMorris *et al.*, 1999). On notera cependant que l'hypothèse selon laquelle l'amélioration des performances est médiée par une libération centrale de catécholamines reste au stade de simple supposition. En effet, il est possible que d'autres changements biochimiques ou hormonaux, résultants d'une modification de la concentration de catécholamines, soient responsables de cet effet de facilitation (McMorris *et al.*, 1999).

En ce qui concerne l'utilisation de la technique des potentiels évoqués cérébraux dans l'étude de l'effet de l'exercice sur les performances cognitives, l'indice le plus couramment utilisé est la composante P300. Cette composante reflète l'activité neuroélectrique liée aux processus cognitifs tels que l'allocation attentionnelle et l'activation de la mémoire immédiate. Par ailleurs, l'onde P300 est également sensible aux fluctuations du niveau d'éveil des sujets pouvant être générées par de nombreux facteurs tels que les rythmes circadiens, l'exercice, la fatigue, la privation de sommeil, la consommation de drogues psycho-actives (pour une revue détaillée voir Polich & Kok, 1995).

La composante P300 est une onde positive dont le pic apparaît généralement entre 300 et 600 msec après la présentation du stimulus. D'une part, on considère que la latence du pic est un reflet indirect du niveau d'activation, mais également un index de la durée des processus perceptifs et une partie de l'étape de sélection de la réponse (Duncan-Johnson &

Donchin, 1982 ; Magliero, Bashore, Coles & Donchin, 1984). D'autre part, l'amplitude de l'onde P300 serait associée au niveau de ressources attentionnelles allouées à la tâche (Jocoy, Arruda, Estes, Yagi & Coburn, 1998). L'amplitude et la latence de la composante P300 sont connues pour être deux variables sensibles aux facteurs associés au niveau d'éveil/activation du sujet. Ainsi, l'administration de sédatif (e.g., alcool, scopolamine, sécobarbital) (Rohrbaugh, Stapleton, Parasuraman, Zubovic, Frowein, Varner, Adinoff, Lane, Eckardt & Linnoila, 1987 ; Hammond, Meador, Aung-Din & Wilder, 1987 ; Fowler & Mitchell, 1997 cités par Yagi *et al.*, 1999) et la privation de sommeil (Smulders, 1993 cités par Yagi *et al.*, 1999) induisent une augmentation de la latence et une diminution de l'amplitude du pic de la P300. En revanche, les effets opposés sont observés lors de l'administration de stimulants (e.g., caféine, physostigmine, nicotine) (Lorist, Snel & Kok, 1994 ; Hammond *et al.*, 1987 cités par Yagi *et al.*, 1999 ; Knott, Bosman, Mahoney, Ilivitsky & Quirt, 1999).

La technique des potentiels évoqués cérébraux utilisée par Yagi *et al.* (1999) suggère une diminution de la latence du pic et une diminution de l'amplitude de l'onde P300 au cours de l'exercice. Les auteurs interprètent ce résultat comme la conséquence 1) d'une augmentation du niveau d'activation du système nerveux central et 2) d'une diminution de l'allocation attentionnelle dans la tâche cognitive, due à la réalisation simultanée de la tâche de pédalage à une fréquence imposée (60 tr. min^{-1}). Les données électroencéphalographiques (EEG) rapportées par Kubitz et Mott (1996) et Magnié, Bermon, Martin, Madany-Lounis, Suisse, Muhammad et Dolisi (2000) plaident également en faveur d'un phénomène d'activation induit par l'exercice.

En effet, Kubitz et Mott (1996) se sont intéressés aux fluctuations du niveau d'activation cérébral (niveau d'activité des ondes alpha et bêta) pendant la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale. Classiquement, on considère qu'une augmentation de l'activation cérébrale est associée à une diminution du niveau d'activité des ondes alpha et une augmentation du niveau d'activité des ondes bêta. Inversement, une augmentation des ondes alpha et une diminution des ondes bêta reflètent une diminution de l'activation cérébrale. L'enregistrement de l'activité EEG spontanée des sujets, effectué au cours de cette étude, suggère clairement une augmentation de l'activité cérébrale pendant l'exercice comparativement au repos.

Les résultats de Yagi *et al.* (1999) ont été partiellement répliqués au cours d'un protocole légèrement différent réalisé par Magnié *et al.* (2000). En effet, les données électrophysiologiques obtenues confirment une diminution de la latence du pic de la P300 avec l'exercice. L'enregistrement EEG a été effectué dans le cadre d'un protocole d'effort maximal, l'activité électrique cérébrale était enregistrée avant et après l'exercice après que les valeurs de fréquences cardiaques et que la température corporelle des sujets étaient revenues au même niveau que les valeurs pré-exercice. Comparativement aux valeurs de références, l'analyse des tracés EEG révèle une diminution post-exercice de la latence du pic et une augmentation de l'amplitude de l'onde P300. Ces données confirment, d'une part, que l'exercice induit une diminution de la latence du pic de la P300 et, d'autre part, que ces changements sont indépendants des modifications cardiaques et thermorégulatrices.

Tâche de temps de réaction de choix versus temps de réaction simple

Comme nous l'avons vu précédemment, les caractéristiques de la tâche cognitive semblent affecter le sens et l'amplitude de l'effet de l'exercice. S'il est clairement établi que la réalisation d'un exercice physique peut induire une amélioration des performances cognitives lors de tâches complexes, cet effet de facilitation est beaucoup plus controversé lorsqu'il s'agit de la réalisation de tâches cognitives simples.

A notre connaissance, seules deux études ont observé une amélioration des performances cognitives au cours d'une tâche de temps de réaction simple (TRS) (Travlos, Marisi, Korisis, Papathanasopoulou & Kaczynski, 1992 cités par Collardeau, 2001; Collardeau, Brisswalter & Audiffren, 2001). D'une part, Travlos *et al.* (1992) ont mis en évidence une diminution du temps de réaction immédiatement après la réalisation d'un exercice triangulaire d'intensité maximale. D'autre part, Collardeau *et al.* (2001) ont observé une amélioration des performances de TRS à partir de la 40^{ème} minute ($M = 12$ msec) d'un exercice de course sur tapis roulant, réalisé à une intensité correspondant au seuil ventilatoire. Cependant, nous resterons prudents vis-à-vis de l'interprétation de ce dernier résultat. En effet, bien qu'une session d'apprentissage ait été effectuée et qu'aucun effet de l'exercice n'ait été observé sur la variance du TR, le protocole expérimental mis en œuvre ne permet pas de déterminer si l'amélioration des performances résulte effectivement d'un effet de facilitation induit par l'exercice physique ou s'il est le résultat d'un effet d'apprentissage.

En revanche, si on considère uniquement les protocoles expérimentaux au cours desquels les sujets sont invités à réaliser une tâche de TRS pendant un exercice de pédalage d'intensité sous-maximale, les auteurs rapportent systématiquement une dégradation ou une absence d'effet de l'exercice sur les performances cognitives (McMorris & Keen, 1994 ; Brisswalter, Durand, Delignières & Legros, 1995 ; Brisswalter *et al.*, 1997 ; Delignières, Brisswalter & Legros, 1993 ; McMorris & Keen, 1994). Toutes choses étant égales par ailleurs, la disparité des résultats entre les tâches de TRS et de TRC semble directement liée à la nature de la tâche cognitive.

La dégradation des performances de TRS est généralement expliquée par la survenue d'un effet de la double tâche négatif, particulièrement important lors de tâches cognitives simples (Delignières *et al.*, 1993) et lors de tâches physiques où le sujet est obligé de maintenir une fréquence de pédalage imposée (Brisswalter *et al.*, 1995). De plus, certains auteurs suggèrent que certains facteurs motivationnels pourraient expliquer la dégradation des performances observée lors de la réalisation de tâches cognitives simples (Brisswalter *et al.*, 1997, 2002 ; Collardeau, Brisswalter, Vercruyssen, Audiffren & Goubault, 2001 ; Isaacs & Polhman, 1991 ; McMorris & Keen, 1994). D'après Kahneman (1973) la capacité de ressources attentionnelles est variable et dépend directement de l'estimation de l'effort à investir afin d'effectuer correctement la tâche demandée. Or, si l'on considère que la difficulté subjective varie en fonction de la complexité de la tâche, la quantité de ressources et l'effort investi dans une tâche de TRS sont certainement moins importants qu'au cours d'une tâche de TRC. La quantité de ressources allouées à la tâche et l'investissement des sujets pourraient donc expliquer cette dégradation des performances. Cette explication nous paraît cependant quelque peu *ad hoc* et peu heuristique (Popper, 1959).

Ainsi, l'ensemble des résultats de la littérature suggère que la constitution de la population d'étude soit effectuée avec beaucoup de soins. Une sélection rigoureuse des sujets a donc été réalisée afin de travailler avec un groupe de sujets composé uniquement de sportifs experts en sport de prise de décisions, ayant une bonne condition physique et une pratique physique régulière. De la même façon, l'utilisation d'une tâche complexe (de type TRC à 4 éventualités) a été préférée à une tâche simple (de type TRS). Concernant la manipulation des caractéristiques de la sollicitation physiologique, l'intensité relative d'exercice a été déterminée individuellement afin d'être comprise entre 40% et 60% de PMA, et la fréquence

de pédalage restait libre, afin de ne pas surcharger le système de traitement de l'information. Les différentes épreuves d'effort, réalisées dans le cadre de ce mémoire, ont été effectuées au Service d'Explorations Fonctionnelles Respiratoires du Centre Hospitalier Universitaire de Poitiers. L'objectif de ces épreuves était de mesurer le $\dot{V}O_2\text{max}$, la PMA et de déterminer le seuil ventilatoire de chaque sujet.

II. EPREUVE D’EFFORT ET NOTION DE SEUILS VENTILATOIRES

Définitions des seuils ventilatoires

L’étude de la ventilation au cours d’exercices d’intensité croissante permet d’observer deux cassures ou seuils sur la courbe de la ventilation en fonction de la charge. Le premier seuil ventilatoire (Wasserman, Whipp, Koyal & Beaver, 1973) est également appelé ‘seuil anaérobie’ ou ‘seuil d’adaptation ventilatoire’. Le deuxième seuil ventilatoire (Wasserman & Mac Ilroy, 1964) appelé ‘seuil de décomposition de l’acidose métabolique’ est également nommé ‘seuil d’inadaptation ventilatoire’. L’explication des cassures de la courbe de ventilation étant vraisemblablement multifactorielle, une terminologie sans connotation physiologique est parfois préférée : premier seuil ventilatoire (SV1) et deuxième seuil ventilatoire (SV2) (Vallier, Bigard, Carré, Eclache & Mercier, 2000) (Figure 2).

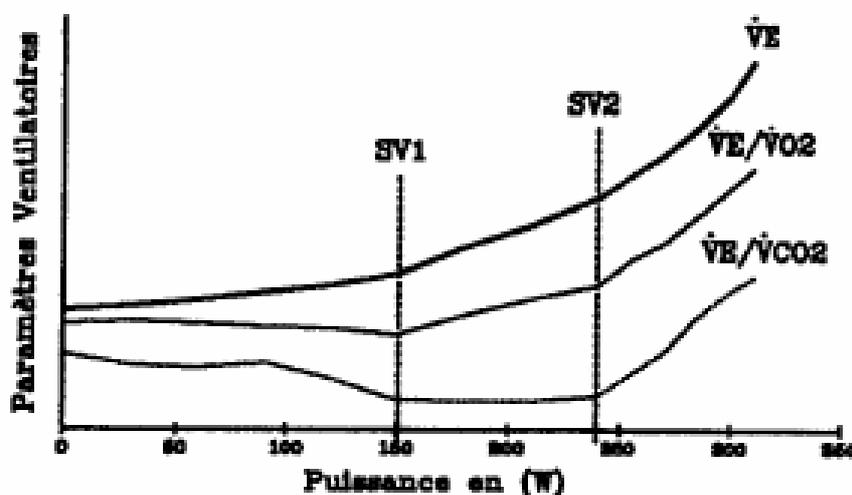


Figure 2. Définition des seuils ventilatoires (SV1 : premier seuil ventilatoire, SV2 : deuxième seuil ventilatoire) en fonction de l’évolution des paramètres ventilatoires (\dot{V}_E : Débit d’oxygène, \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} : Equivalent respiratoire pour l’oxygène, \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} : Equivalents respiratoires pour le gaz carbonique) en fonction de la puissance mécanique (Watts) (d’après Préfault & Mercier, 1993).

A faible intensité, le débit d’oxygène (\dot{V}_{O_2}) et de gaz carbonique (\dot{V}_{CO_2}) évoluent parallèlement et le débit ventilatoire (\dot{V}_E) augmente de façon linéaire. Les équivalents

respiratoires pour l'oxygène ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$) et pour le gaz carbonique ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$) sont stables et proportionnels. A partir d'un certain stade, on observe une cassure sur les courbes de $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ et $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ qui correspond au premier seuil ventilatoire ou seuil anaérobie. Wasserman *et al.* (1973) définissent le premier seuil ventilatoire comme le niveau de charge pour lequel on observe : 1) une augmentation non linéaire de $\dot{V}E$, 2) une augmentation non linéaire de $\dot{V}CO_2$, 3) un rapport $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ constant et 4) une augmentation du rapport $\dot{V}E/\dot{V}O_2$. Le premier seuil ventilatoire est la conséquence d'une stimulation des centres respiratoires suite au tamponnement des ions H^+ par les ions bicarbonates CO_3H^- qui induit alors une formation extra métabolique de CO_2 .

Au-delà d'une certaine intensité, l'augmentation de la sollicitation provoque une deuxième cassure dans l'évolution de $\dot{V}E$. Cette cassure correspond au deuxième seuil ventilatoire ou seuil d'inadaptation ventilatoire qui se définit comme le niveau de charge pour lequel on observe : 1) une deuxième augmentation non linéaire de $\dot{V}E$, 2) une deuxième augmentation non linéaire de $\dot{V}CO_2$, 3) une première augmentation non linéaire du rapport $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ (Wasserman & Mac Ilroy, 1964). L'apparition du seuil d'inadaptation ventilatoire s'explique essentiellement par la survenue d'une acidose (diminution du pH) due à une insuffisance du pouvoir tampon du bicarbonate. Cependant, on notera que l'explication des cassures observées au niveau de la cinétique de $\dot{V}E$ est certainement de nature multifactorielle. Il semblerait que le CO_2 et les ions H^+ ne soient pas les seuls facteurs à stimuler la ventilation. Les catécholamines, l'ion ammonium et le potassium agiraient également comme des facteurs stimulant la ventilation.

Utilisation expérimentale des seuils ventilatoires

Bien qu'aucune relation de cause à effet n'existe réellement entre les seuils ventilatoires et les seuils lactiques, il existe tout de même une concomitance au niveau de l'évolution des lactates sanguins et de la ventilation. L'évolution des paramètres ventilatoires étant différente en fonction de l'intensité de la charge mécanique, ces indices physiologiques sont généralement utilisés dans le cadre d'études non invasives afin de déterminer les intensités de travail.

Lors d'exercices d'intensité constante, si la charge de travail est fixée au-dessus du premier seuil ventilatoire, on observe une dérive ventilatoire au cours de l'exercice due à l'augmentation du $\dot{V}CO_2$. Le $\dot{V}E$ augmente continuellement jusqu'à provoquer l'arrêt de l'exercice. Le mécanisme anaérobie lactique est principalement sollicité et l'intensité d'exercice est qualifiée de sous-maximale intense. En revanche, lorsque la charge de travail est fixée en dessous du premier seuil ventilatoire, on observe tout d'abord une phase d'accrochage ventilatoire au cours de laquelle le $\dot{V}E$ augmente rapidement, puis une augmentation progressive et parallèle de $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$ et $\dot{V}CO_2$ jusqu'à un état stable obtenu généralement après 2 minutes d'exercice. Le principal mécanisme sollicité est le mécanisme aérobie et l'intensité d'exercice est dite sous-maximale modérée.

Protocole d'effort maximal

La consommation maximale d'oxygène et les seuils ventilatoires peuvent être déterminés au cours d'une même épreuve d'effort. Cependant, la détermination des seuils est plus facile lorsqu'un protocole d'effort progressif de charge croissante, précédé d'un échauffement de quelques minutes, est mis en place. Il est également préférable d'utiliser des paliers brefs, c'est à dire incrémentés toutes les minutes, afin que l'incrément de la puissance soit rapide (Wasserman *et al.*, 1973). Généralement, la durée de l'épreuve d'effort est comprise entre 8 et 12 minutes et le maintien d'une fréquence de pédalage constante tout au long de l'épreuve est préconisé.

Indices physiologiques utilisés

Au cours de la première expérience, la PMA, correspondant à l'intensité atteinte à $\dot{V}O_{2max}$, a été utilisée pour déterminer les charges relatives de travail (20% et 50% de PMA). Le premier seuil ventilatoire nous a seulement permis de caractériser individuellement et *a posteriori* le principal mécanisme sollicité au cours des différentes sessions expérimentales.

Au cours de la deuxième expérience, la charge de travail de chaque sujet a été déterminée en fonction de l'intensité atteinte au premier seuil ventilatoire (90% du seuil). La nature de la sollicitation était donc la même pour tous les sujets.

Au cours des deux dernières expériences, la sélection des sujets a été faite à la fois en fonction de la PMA et de l'intensité atteinte au seuil. En effet, pour participer à ces deux expériences, les sujets devaient systématiquement avoir un premier seuil ventilatoire correspondant à une puissance d'exercice inférieure ou égale à 50% de leur PMA.

Caractéristiques des différentes épreuves d'effort

Les différentes épreuves d'effort, effectuées dans le cadre de ce travail, consistaient en la réalisation d'un protocole de type triangulaire sur bicyclette ergométrique (Ergoline 800S). Au cours de ce type de protocole, le sujet réalise un exercice progressif de charge croissante au cours du temps. Le principe est de poursuivre l'incrémentation de la puissance de travail jusqu'à l'atteinte de la PMA qui est déterminée selon les critères suivants : 1) une incapacité à maintenir la cadence de pédalage imposée ($60 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$) ; 2) l'atteinte d'un plateau au niveau de la cinétique de la consommation d'oxygène en fonction du temps (augmentation inférieure à $150 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$) et 3) l'atteinte d'une fréquence cardiaque proche de la fréquence cardiaque maximale théorique ($220 - \text{âge}$).

Les paramètres cardio-respiratoires et métaboliques étaient enregistrés en continu par l'intermédiaire d'un électrocardiogramme et d'un poste de métabolisme (CPX Medical Graphics pour l'expérience 1, MEDI SOFT : Exp'air, 1.26 pour les expériences 2, 3 et 4) permettant une analyse des gaz (O_2 , CO_2) et une mesure des débits inspiratoires et expiratoires pendant l'effort. Les sujets étaient équipés d'un masque hermétique relié au pneumotachographe (Type 3, Hans Rudolph). Le pneumotachographe était calibré en volume avant chaque session d'effort avec une seringue adéquate (seringue de trois litres). Les valeurs de température, d'hygrométrie et de pression atmosphérique étaient également prises en compte.

Au cours des deux premières expériences, le test débutait après une période d'échauffement de 5 minutes réalisée à une puissance de 75 watts, suivie d'une période de récupération de 3 minutes. La puissance initiale de pédalage de 25 watts était ensuite incrémentée toutes les minutes de 25 watts jusqu'à l'épuisement du sujet. Afin d'observer une cinétique progressive au niveau des paramètres ventilatoires, facilitant la détermination des seuils ventilatoires, la période de récupération a été supprimée au cours des deux dernières expériences. Après une période d'échauffement de 5 minutes réalisée à une puissance de 25

watts, le test débutait à une puissance initiale de pédalage de 50 watts incrémentée par la suite de 25 watts toutes les minutes jusqu'à l'épuisement du sujet.

Les critères d'atteinte de $\dot{V}O_2\text{max}$ retenus étaient : 1) une impossibilité pour le sujet à continuer l'exercice demandé malgré les encouragements, 2) l'atteinte d'un plateau au niveau de la cinétique de la consommation d'oxygène en fonction du temps, 3) un quotient respiratoire supérieur à 1,15 ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) et 4) l'atteinte d'une fréquence cardiaque proche de la fréquence cardiaque maximale théorique.

En ce qui concerne la détermination du premier seuil ventilatoire, nous avons utilisé comme indicateurs les équivalents respiratoires pour l'oxygène ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$) et pour le gaz carbonique ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$). Ces indicateurs sont définis comme les plus sensibles et les plus spécifiques pour déterminer les seuils ventilatoires et lactiques (Davis, Basset, Hugues & Gass, 1983 ; Préfaut & Mercier, 1993). La détermination du seuil ventilatoire a été réalisée par une méthode de détermination visuelle basée sur 4 critères d'observation : 1) une augmentation non linéaire de la ventilation ; 2) une augmentation non linéaire de la production de gaz carbonique ; 3) un équivalent respiratoire pour le gaz carbonique constant et 4) une augmentation de l'équivalent respiratoire pour l'oxygène (Wasserman *et al.*, 1973). L'intensité d'exercice retenue comme correspondant à l'intensité atteinte au seuil a été déterminée sur la base d'un compromis entre les valeurs estimées par trois expérimentateurs différents déjà sensibilisés à ce type de détermination visuelle.

Afin de préciser l'effet de facilitation des performances induit par la réalisation d'un exercice physique, les différents protocoles expérimentaux, mis en place dans le cadre de ce mémoire, se sont tous basés sur l'utilisation du paradigme de chronométrie mentale. Les hypothèses concernant l'organisation du traitement de l'information ont également été appréhendées par l'intermédiaire du modèle cognitivo-énergétique du stress et de la performance de Sanders (1983) sur lequel nous reviendrons en détail par la suite. Dans les chapitres qui suivent, nous définirons d'abord le paradigme de chronométrie mentale, nous expliciterons ensuite la méthode d'inférence majeure de ce travail à savoir la méthode des facteurs additifs (MFA) de Sternberg (1969).

III. PARADIGME DE LA CHRONOMETRIE MENTALE

Les travaux présentés dans le cadre de ce mémoire sont axés sur l'étude du traitement de l'information. L'être humain est ici assimilé à une machine à traiter de l'information. Les informations présentées au sujet représentent l'entrée du système et l'amorce d'une réponse motrice constitue la sortie du système. La structure interne de ce système ou "Boite noire" est constituée d'une série d'étapes de traitement qui ne sont pas directement observables (Figure 3). Cependant, plusieurs méthodes expérimentales permettent d'appréhender la nature spécifique des opérations se déroulant entre la présentation d'un stimulus et la production d'une réponse motrice. La chronométrie mentale représente l'un de ces outils permettant la compréhension des différentes transformations effectuées.



Figure 3. Représentation schématique de la structure interne du système de traitement de l'information.

Principe

Le paradigme de la chronométrie mentale part du principe que les processus mentaux peuvent être étudiés par l'intermédiaire de la mesure du temps de traitement de l'information. En effet, un certain nombre d'inférences peut être effectué grâce à la mesure du TR. Cette variable comportementale correspond à l'intervalle de temps séparant le moment d'occurrence du signal de réponse et l'amorce de la réponse. Classiquement, on considère que le TR reflète la somme des durées de l'ensemble des étapes de traitement se déroulant à l'intérieur de la "Boîte noire". Il constitue donc une bonne estimation de la vitesse de traitement de l'information. Les facteurs qui influencent le TR sont nombreux et affectent généralement un processus de traitement spécifique. Un certain nombre de ces facteurs seront examinés dans le chapitre suivant (cf., *Méthode des Facteurs Additifs*). Ainsi, les mesures de TR sont

généralement effectuées dans différentes conditions afin de comparer l'influence des facteurs expérimentaux manipulés sur la vitesse de traitement de l'information.

Procédure de temps de réaction

Lors d'une procédure de TR classique, le sujet est invité à répondre le plus rapidement possible, sans commettre d'erreur, dès l'apparition d'un stimulus sensoriel donné par un mouvement préalablement défini. Dans la mesure où le sujet respecte les consignes expérimentales, on considère que le TR représente le temps minimal nécessaire pour fournir la réponse requise. Une tâche de TR commence généralement par la présentation d'un signal préparatoire (Figure 4). Ce dernier informe de l'apparition imminente d'un signal impératif de réponse, et peut également donner des informations sur la nature du signal de réponse et/ou sur la réponse à fournir. L'intervalle de temps séparant le signal préparatoire et l'occurrence du signal de réponse est appelé période préparatoire. Au cours de cette période, le sujet se prédispose à répondre le plus rapidement et le plus précisément possible. L'intervalle de temps séparant l'occurrence du signal de réponse et l'amorce de la réponse motrice correspond au TR, tandis que l'intervalle séparant l'amorce de la réponse de la fin de la réponse définit le temps de mouvement.

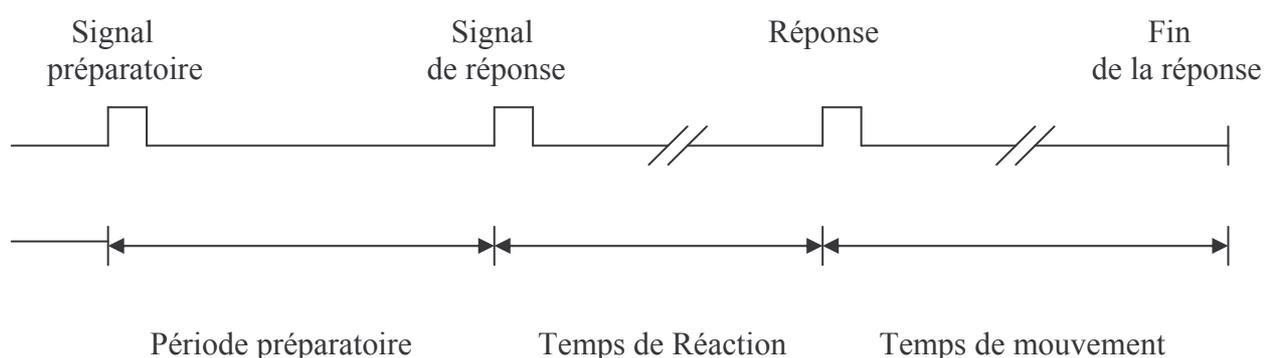


Figure 4. Déroulement d'un essai au cours d'une procédure classique de temps de réaction.

Lors de ce type de tâches, le sujet se doit de réduire le plus possible son temps de réponse tout en conservant une réponse correcte. Le traitement des résultats ne tient donc généralement pas compte des réponses incorrectes (anticipation et des omissions) qui violent la définition de base du TR. De plus, partant du principe que toute réponse erronée résulte d'un traitement anormal du stimulus, seuls les essais ayant abouti à la production d'une réponse correcte sont pris en compte.

Compromis vitesse-précision

Malgré ces précautions méthodologiques et les instructions délivrées par l'expérimentateur, il n'est pas évident que les valeurs de TR enregistrées correspondent réellement à la définition théorique du TR attendue par l'expérimentateur. Classiquement, on considère donc qu'un TR légèrement inférieur au TR théorique, c'est à dire correspondant à un TR pour lequel on enregistre un taux d'erreur inférieur à 5%, est acceptable (Pachella, 1974). Par ailleurs, il arrive que la manipulation d'un facteur expérimental s'accompagne d'un changement de stratégie du sujet vis-à-vis du compromis entre la vitesse et la précision (Figure 5). Lorsque la manipulation d'un facteur engendre des modifications à la fois au niveau du TR et du taux d'erreurs, et que ces changements vont dans le même sens (augmentation du TR associée à une augmentation du taux d'erreurs ou diminution du TR associée à une diminution du taux d'erreurs), les résultats restent exploitables. On considèrera cependant que l'amplitude de l'effet du facteur manipulé est certainement sous-estimée. En revanche, lorsque les modifications observées au niveau du TR et du taux d'erreurs évoluent dans le sens opposé (augmentation du TR associée à une diminution du taux d'erreurs ou diminution du TR associée à une augmentation du taux d'erreurs), il devient quasiment impossible de différencier les effets du facteur manipulé de ceux induits par un changement de stratégie. L'interprétation des résultats est alors extrêmement délicate. Afin d'éviter un certain nombre d'erreurs d'interprétation, il est donc nécessaire d'étudier systématiquement les variations du taux d'erreurs afin de s'assurer de l'absence de changement de stratégie vis-à-vis de l'échange vitesse-précision entre les différentes conditions expérimentales. En résumé, quel que soit le niveau du facteur manipulé, il est indispensable d'enregistrer un taux d'erreur peu élevé et constant.

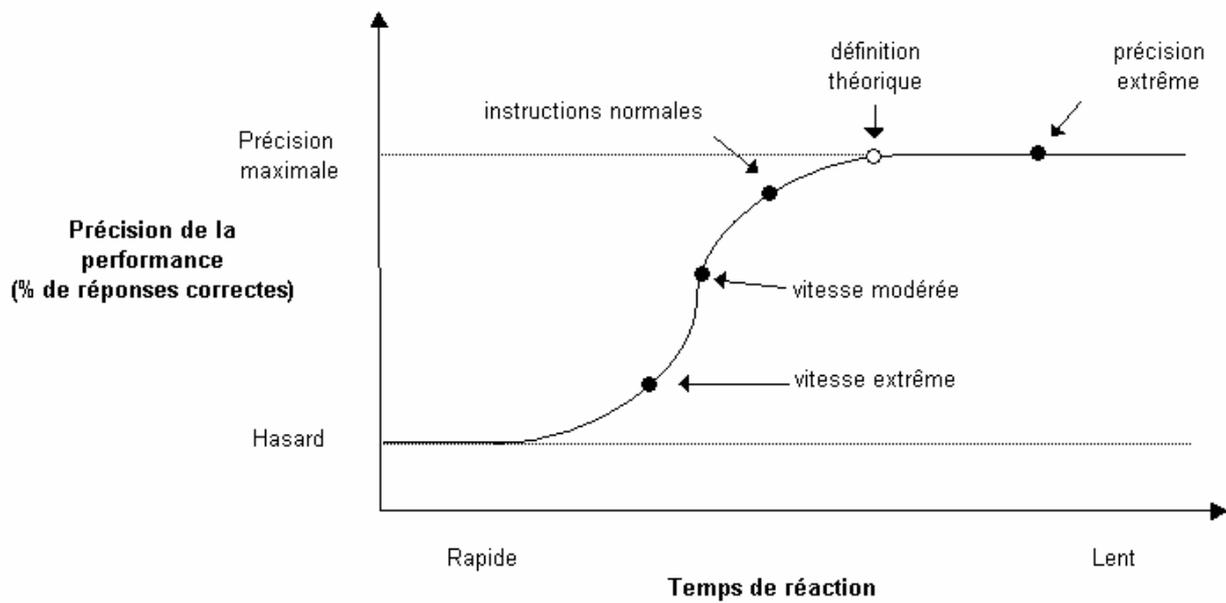


Figure 5. Courbe théorique de l'échange vitesse-précision en temps de réaction (d'après Pachella, 1974).

IV. METHODE DES FACTEURS ADDITIFS

Définition

La Méthode des Facteurs Additifs (MFA) a été développée par Sternberg (1969) afin d'étudier la structure fonctionnelle du traitement de l'information. Cette méthode d'inférence a été élaborée dans le cadre d'un mode de traitement sériel discret. L'organisation séquentielle du traitement de l'information a longtemps été considérée comme un élément déterminant l'utilisation de la MFA. Cependant, certains travaux récents (Miller, van der Ham & Sanders, 1995 ; Sternberg, 2001) ont montré que cette logique d'inférence est également compatible avec la plupart des agencements parallèles.

Pour être opérationnelle, la MFA demande qu'un certain nombre de postulats soit respecté. Le TR représente le temps nécessaire à la mise en œuvre d'une série d'étapes (ou stades) fonctionnellement distinctes. Une étape de traitement est alors considérée comme une série de processus qui opèrent sur une entrée pour produire une sortie. Dans un tel modèle, les processus rétroactifs n'ont pas leur place et on considère qu'aucune sortie ne peut influencer le stade qui la précède. Chaque stade reçoit les informations du stade précédent, transforme ces données et les transmet au stade suivant, sans modifier la qualité de traitement (postulat de sortie constante). D'une part, on considère que les transformations effectuées par un stade sont indépendantes de celles des autres stades et, d'autre part, qu'il existe des facteurs expérimentaux qui n'influencent pas la durée de certaines étapes (postulat d'influence sélective).

Logique d'inférence

Partant de ces différents postulats de base, l'analyse des patrons d'interaction entre différents facteurs expérimentaux permet de faire un certain nombre d'inférences. On considère que si deux facteurs F et G affectent sélectivement des étapes de traitement différentes (Figure 6.1), alors leurs effets sur le TR moyen ainsi que sur la variance du TR (Miller *et al.*, 1995) doivent être additifs car les durées des stades sont additives. Inversement, si deux facteurs F et G influencent au moins un stade de traitement en commun (Figure 6.2 et Figure 6.4), il y a tout lieu d'attendre à ce que leurs effets, au niveau du TR moyen, soient en

interaction. La logique de la MFA repose sur l'inversion de cette logique d'inférence. On considère que si une additivité est observée entre les effets de deux facteurs expérimentaux, l'hypothèse la plus vraisemblable est qu'ils affectent des stades de traitement distincts. Au contraire, si une interaction est observée entre deux facteurs, ce résultat suggère fortement qu'ils influencent un ou plusieurs stades de traitement en commun. L'observation d'une interaction de second ordre entre trois facteurs suggère, quant à elle, que les trois facteurs affectent au moins un stade commun (Figure 6.3).

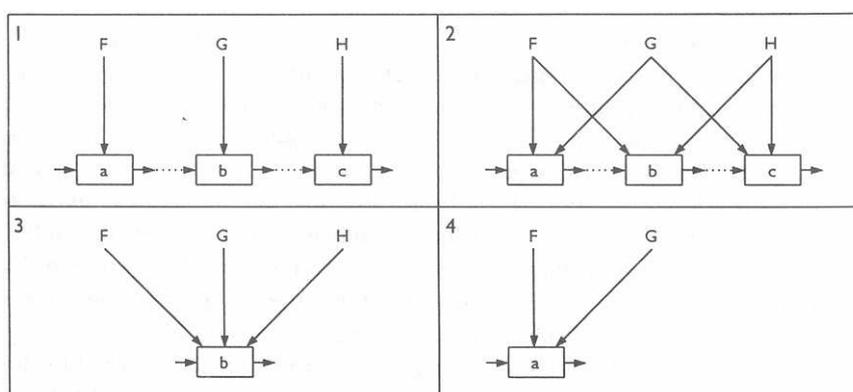


Figure 6. Illustration de la logique des facteurs additifs d'après Sternberg (1969).

L'observation d'un patron d'additivité robuste entre différents facteurs expérimentaux a permis de mettre en évidence l'existence d'un nombre défini de stades. La décomposition du traitement de l'information fait aujourd'hui l'objet d'un consensus, on distingue des étapes sensorielles, des étapes décisionnelles et des étapes motrices. On notera cependant qu'en fonction de l'incertitude événementielle de la tâche, les processus de traitement mis en œuvre semblent sensiblement différents. En effet, au cours d'une tâche de TR simple, le sujet n'a aucune incertitude quant à la nature du stimulus qui va lui être présenté et à la réponse qu'il devra produire. Il s'agit donc pour le sujet d'effectuer une simple synchronisation entre l'apparition du signal de réponse et le déclenchement de sa réponse motrice. La seule décision qu'il aura à prendre sera de décider de répondre au stimulus présenté ou de ne pas répondre dans le cas où des essais pièges pourraient lui être présentés. En revanche, le traitement de l'information lors d'une tâche de TRC nécessite l'extraction des caractéristiques du signal, la sélection, la programmation et l'exécution de la réponse appropriée. D'une tâche à l'autre, il

semblerait que les étapes périphériques restent identiques mais que les étapes centrales de traitement soient plus ou moins complexes.

L'observation de patrons d'interaction est, quant à elle, utilisée pour étudier l'influence de facteurs expérimentaux peu connus. En manipulant la durée de chaque stade par l'intermédiaire de la nature de la tâche demandée, la MFA permet de localiser le site d'influence d'un facteur parmi l'ensemble des stades dont l'existence est déjà établie. Lorsque deux facteurs affectent au moins une étape commune, la somme des effets de chaque facteur n'est pas égale à l'effet global observé au niveau du TR moyen. Une interaction est dite sur-additive si l'effet combiné de la manipulation de deux facteurs est supérieur à la somme des effets de la manipulation séparée des deux facteurs. Inversement, une interaction est dite sous-additive si l'effet combiné de la manipulation de deux facteurs est inférieur à la somme des effets de la manipulation séparée des deux facteurs. On considère que l'observation d'une interaction sous-additive reflète la manipulation de deux facteurs affectant deux processus distincts opérant en parallèle au niveau d'un même stade de traitement.

Influence sélective des facteurs expérimentaux

Généralement, les facteurs expérimentaux manipulés dans le cadre de la logique de la MFA sont l'intensité du signal, la qualité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et l'incertitude temporelle. Ces différents facteurs cognitifs sont connus pour affecter des étapes de traitement distinctes (postulat d'influence sélective) :

- La manipulation de *l'intensité d'un signal* visuel influence spécifiquement les étapes sensorielles de traitement et plus précisément l'étape de prétraitement du stimulus (Sanders, 1990). L'utilisation d'un stimulus visuel est préférée à celle d'un signal impératif de réponse auditif. En effet, Beehler, Kamen et Morris (1991) ont montré que l'effet de l'intensité d'un signal auditif est inversement proportionnel à la rapidité des processus moteurs. Ce résultat suggère, d'une part, que la manipulation de l'intensité d'un signal visuel affecte non seulement les processus sensoriels mais également les processus moteurs et remet en cause, d'autre part, l'influence sélective de la manipulation de ce facteur expérimental. En revanche, à notre connaissance, aucun résultat ne remet en cause l'influence sélective de l'intensité d'un signal visuel au niveau de l'étape de prétraitement du stimulus. Lorsqu'un signal visuel est

manipulé, le TR est plus long dans la condition de faible intensité lumineuse par rapport à la condition de forte intensité lumineuse (Nissen, 1977). Ce changement s'expliquerait par l'effet de la manipulation de ce facteur sur la décharge des cellules ganglionnaires de la rétine (Lennie, 1998 citée par Courtière, Hardouin, Vidal, Possamaï & Hasbroucq, 2003).

- *La qualité du signal* peut être manipulée en dégradant le signal impératif de réponse. Classiquement, le TR est plus long lorsque le signal est dégradé que lorsque le signal est intact (Sanders, 1980 ; Sanders, 1983). Cette modification du TR reflète une augmentation de la durée des processus perceptifs et plus précisément un allongement de la durée de l'étape d'extraction des caractéristiques physiques du stimulus (Sanders, 1998).

- La manipulation de *la compatibilité stimulus-réponse* affecte les étapes centrales de traitement et plus précisément la durée de l'étape de sélection de la réponse (Sanders, 1990). Classiquement, lorsque la règle est incompatible le TR est plus long que lorsque la règle est compatible.

- *L'incertitude temporelle* est généralement manipulée par l'intermédiaire de la durée de la période préparatoire. Cette manipulation est connue pour affecter les étapes périphériques d'exécution de la réponse et plus précisément l'étape d'ajustement moteur (Spijkers & Walter, 1985 ; Hasbroucq, Mouret, Seal & Akamatsu., 1995). Lorsque la durée de la période préparatoire est manipulée d'un bloc d'essais à un autre, on observe un allongement du TR avec l'augmentation de la durée de la période préparatoire. Chez l'homme, les performances de TR optimales sont obtenues pour une période préparatoire de 500 msec (Hasbroucq *et al.*, 1995).

Limites de l'utilisation de la Méthode des Facteurs Additifs

Afin d'analyser les patrons d'interaction entre les différents facteurs expérimentaux manipulés, l'analyse de variance (ANOVA) est toujours utilisée conjointement à la MFA. En général, la MFA utilise le TR lui-même comme variable dépendante car l'additivité est généralement détruite par l'utilisation de transformation non-linéaire des mesures (e.g., transformation logarithmique, médiane). En revanche, les transformations par soustraction et l'utilisation d'analyse de covariance (ANCOVA) ne sont pas incompatibles avec les postulats de base de la MFA. En effet, l'ANCOVA est une analyse de variance prenant simplement en

considération la variabilité induite par un facteur autre que le facteur manipulé et le procédé qui sous-tend la transformation par soustraction est le même que celui utilisé dans la Méthode Soustractive de Donders (1968). Or cette méthode s'avère être à la base du modèle sériel discret ayant servi de sous-bassement théorique à la MFA.

Etant donné que la MFA et l'ANOVA sont toujours utilisées conjointement, la mise en évidence exclusive de patrons d'additivité ne permet pas de conclure et pose de réels problèmes d'interprétation (Fowler, Hofer, & Lipitkas, 2000, 2001 ; Smulders & Van der Molen, 2001). En effet, l'interprétation d'une additivité n'est pas évidente car elle est déduite de la non significativité d'une interaction, or l'ANOVA ne permet pas d'estimer le risque d'accepter l'hypothèse nulle à tort (erreur de type II). De plus, il est pratiquement impossible de savoir, par l'intermédiaire d'une analyse de variance, si deux variables n'interagissent pas à un faible degré. Une additivité ne peut donc véritablement être considérée comme une absence réelle d'interaction que si elle s'avère robuste. De façon générale, on considère qu'une additivité est robuste lorsque que cette dernière n'est pas modifiée par l'effet d'un troisième facteur, interagissant avec l'un des deux facteurs additifs.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'observation d'une additivité non conforme à la réalité. Si le contraste entre les différentes modalités du facteur manipulé n'est pas suffisamment important, la manipulation des facteurs expérimentaux peut être la cause de l'observation d'une additivité fortuite. Généralement, l'expérimentateur peut contourner ce problème en multipliant les modalités du facteur manipulé ou en augmentant les doses s'il s'agit d'une substance pharmacologique ou psycho-active (i.e., nicotine). La variabilité peut également masquer une interaction entre deux variables, notamment si cet effet est de faible amplitude. Lorsque les expérimentateurs ont connaissance a priori de ce problème, lié à la présence d'une variabilité non liée à l'effet du facteur manipulé, certaines précautions méthodologiques peuvent être prises. Dans le cadre de l'effet de l'exercice physique, le choix d'une population homogène est préconisé et la prise en considération de la condition physique des sujets est primordiale. Comme nous le verrons au cours de la première expérience, l'enregistrement des performances de référence utilisé conjointement à une analyse de covariance est aussi une solution envisageable.

Il est également possible d'observer une additivité entre les effets de deux facteurs malgré le fait qu'ils affectent des étapes communes. En effet, si deux facteurs affectent deux

même stades de traitement, l'interaction peut être masquée si les durées de deux stades en question sont dépendantes l'une de l'autre et notamment si les effets de ces deux facteurs sont opposés. Inversement, dans certains cas de figure si le postulat de sortie constante est violé l'expérimentateur peut être amené à observer un patron d'interaction entre deux variables qui affectent des processus différents. En effet, la MFA n'est applicable que si les codes de sortie des étapes sont constants et qu'ils sont indépendants des facteurs manipulés.

La MFA est un excellent outil d'inférence pour étudier la structure fonctionnelle du traitement de l'information chez l'homme. De plus, l'application récente de la MFA à l'animal (Courtière, Hardouin, Hasbroucq, Possamaï & Vidal, 2000 ; Courtière *et al.* 2003) ouvre des perspectives de recherches fort intéressantes en ce qui concerne l'utilisation de protocoles plus invasifs que chez l'homme, ainsi que de techniques pharmacologiques et chirurgicales.

V. MODELE COGNITIVO-ENERGETIQUE DU STRESS ET DE LA PERFORMANCE

L'interaction entre les mécanismes énergétiques centraux et les stades de traitement sera abordée à travers le modèle cognitivo-énergétique de Sanders (1983). L'intérêt de ce modèle est qu'il tente de mettre en relation les mécanismes énergétiques et structuraux du système de traitement de l'information. L'ambition de cet auteur était en fait de réconcilier deux approches théoriques de la performance : l'approche micro-économiste qui se base sur l'allocation des ressources du système et l'approche computationnelle qui considère que la réponse du système est le produit d'une succession de stades de traitement qui ne se recouvrent pas. Dans la mesure où nous suspectons que l'exercice physique est un facteur de nature principalement énergétique, le modèle de Sanders nous semble particulièrement adapté pour localiser l'influence de ce facteur au niveau de la chaîne de traitement de l'information.

Ce modèle est organisé en trois niveaux (Figure 7) : le premier niveau est relatif aux différents stades de traitement inférés à partir de la MFA de Sternberg (1969), le second aux mécanismes neurophysiologiques modulant la quantité de ressources allouée aux différents stades et le dernier niveau est un système de régulation qui s'appuie sur un mécanisme d'évaluation.

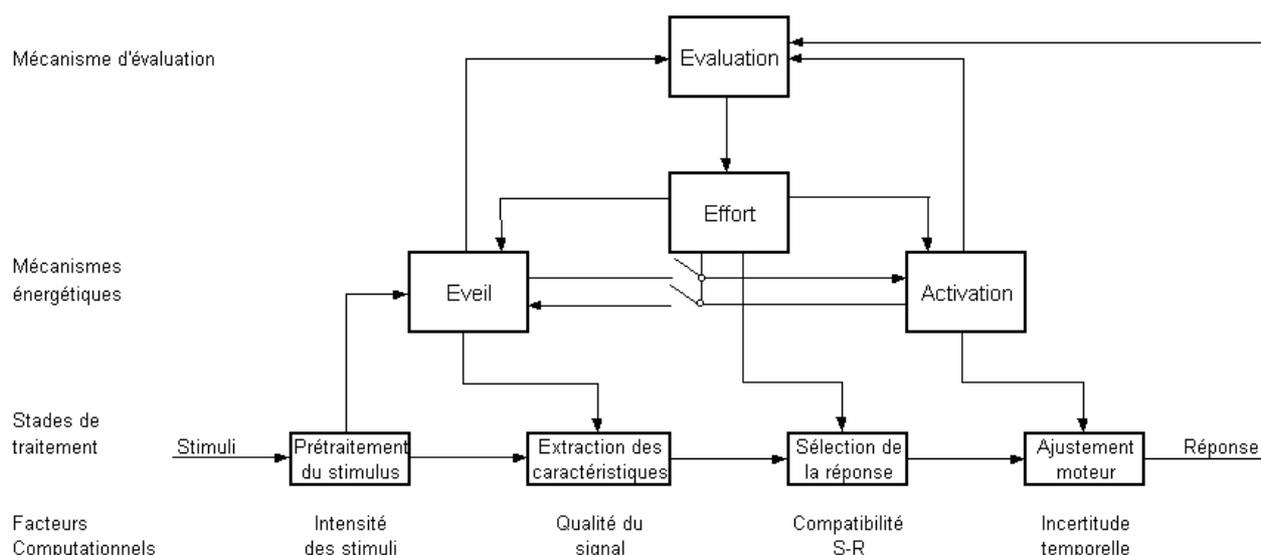


Figure 7. Modèle cognitivo-énergétique du stress et de la performance (Sanders, 1983).

Le premier niveau, cognitif, est composé des quatre stades de traitement fonctionnant selon un mode sériel : 1) le *stade de prétraitement du stimulus* représente une étape d'encodage de la stimulation en message nerveux, d'acheminement de celui-ci jusqu'au système nerveux central et de prétraitement automatique de bas niveau dans les aires sensorielles primaires ; 2) le *stade d'extraction des caractéristiques* est défini comme une étape d'analyse du stimulus en terme de recherche d'indices ou de recherche de caractéristiques ; 3) le *stade de sélection de la réponse* permet la recherche en mémoire motrice d'un programme moteur adapté à la situation ; 4) le *stade d'ajustement moteur* consiste à envoyer le programme moteur en termes directement lisibles par les effecteurs moteurs, et à moduler la préparation du sujet afin de réagir le plus rapidement possible.

Le deuxième niveau, énergétique, correspond aux 3 mécanismes énergétiques du contrôle de l'attention, principalement mis en évidence par des travaux de neurophysiologie et de neuropsychologie : l'éveil, l'activation et l'effort (Pribram & McGuinness, 1975 ; McGuinness & Pribram, 1980). Sanders considère l'éveil et l'activation comme deux mécanismes de base, qui approvisionnent en énergie les processus périphériques de traitement. Ces deux mécanismes sont respectivement associés aux processus d'entrée (processus perceptifs) et de sortie du système (processus moteurs). Le mécanisme de l'éveil reçoit de l'énergie par l'intermédiaire du stade de prétraitement du stimulus et alimente le stade d'extraction des caractéristiques, tandis que le mécanisme de l'activation fournit des ressources au stade d'ajustement moteur. En contrepartie, l'effort représente un mécanisme supérieur qui contrôle et coordonne le niveau des mécanismes de base. Ce mécanisme approvisionne non seulement le stade de sélection de la réponse mais également les deux mécanismes énergétiques de base en cas de rupture de l'équilibre énergétique. Grâce au mécanisme d'évaluation, le mécanisme d'effort est informé de la capacité dont dispose les deux autres mécanismes et des besoins en énergie en fonction des caractéristiques de la tâche (niveau de difficulté, enjeux de la tâche, connaissance du résultat). En cas de déficit, le mécanisme d'effort rehausse le niveau de ressources des mécanismes de base (e.g., monotonie de la tâche, privation de sommeil). A l'inverse, dans le cas d'une sur-stimulation du mécanisme de l'éveil (e.g., stimulus auditif de forte intensité sonore), le mécanisme d'effort peut dissocier les deux mécanismes afin d'éviter l'arrivée soudaine d'une réponse inappropriée. Dans ce cadre théorique, Sanders définit le stress comme un déséquilibre énergétique (déficit ou sur-stimulation) des mécanismes énergétiques de base, qui ne peut être compensé par l'effort.

Toutefois, le nombre de mécanismes énergétiques à la base du comportement est controversé. En effet, Humphreys et Revelle (1984) mettent en relation seulement deux mécanismes énergétiques (l'effort et l'éveil) avec différentes dimensions de la personnalité, différents facteurs situationnels, et différentes tâches cognitives (Annexe 1). Selon ces auteurs, un seul mécanisme énergétique de base modulerait le traitement de l'information (l'éveil), alors que Sanders en distingue deux : l'éveil et l'activation. Cette polémique autour du nombre de réservoirs énergétiques est toujours d'actualité et aucune donnée comportementale ne permet réellement d'objectiver l'une ou l'autre de ces hypothèses. Cependant le modèle de Sanders (1983) semble relativement cohérent avec les travaux de Pribram et McGuiness (1975) et McGuiness et Pribram (1980) distinguant différents systèmes de neurotransmetteurs, chacun d'entre eux ayant une influence spécifique et précise sur le fonctionnement cérébral.

Les systèmes monoaminergique (systèmes noradrénergique, dopaminergique et sérotoninergique) et cholinergique se distinguent d'un point de vue anatomique, électrophysiologique et neurochimique. L'activité simultanée des systèmes monoaminergique et cholinergique est modulable et permet, en situation de stress, d'optimiser l'efficacité du système de traitement sensorimoteur et de faciliter la production d'une réponse motrice. D'un point de vue neuropsychologique, le système noradrénergique est principalement impliqué dans les processus de filtrage attentionnel alors que le système sérotoninergique participe à l'inhibition comportementale. Ces deux systèmes jouent un rôle antagonique fondamental dans la régulation du niveau de vigilance. Le système dopaminergique joue quant à lui un rôle important dans l'organisation, la planification motrice et le contrôle des mouvements volontaires. Enfin, les projections cholinergiques corticales influencent les processus attentionnels et mnésiques (Robbins, 1997).

Il semblerait que ce soit sur la base de ces résultats, que Sanders ait établi une relation entre les différents stades de traitement de l'information et les mécanismes énergétiques, chacun étant fonction d'un système de neurotransmetteurs différents (Figure 8). Le mécanisme d'éveil serait sous-tendu par le système noradrénergique et le système sérotoninergique, dont les structures libératrices sont respectivement le *locus coeruleus* et le noyau du Raphé. Le mécanisme d'activation serait, quant à lui, sous-tendu par le système dopaminergique et le système cholinergique, dont les structures libératrices, sont respectivement la substance noire *pars compacta* et le noyau de Meynert. Enfin, le mécanisme d'effort serait lié au système peptidergique, les peptides étant libérés au niveau de l'hypophyse et du cortex.

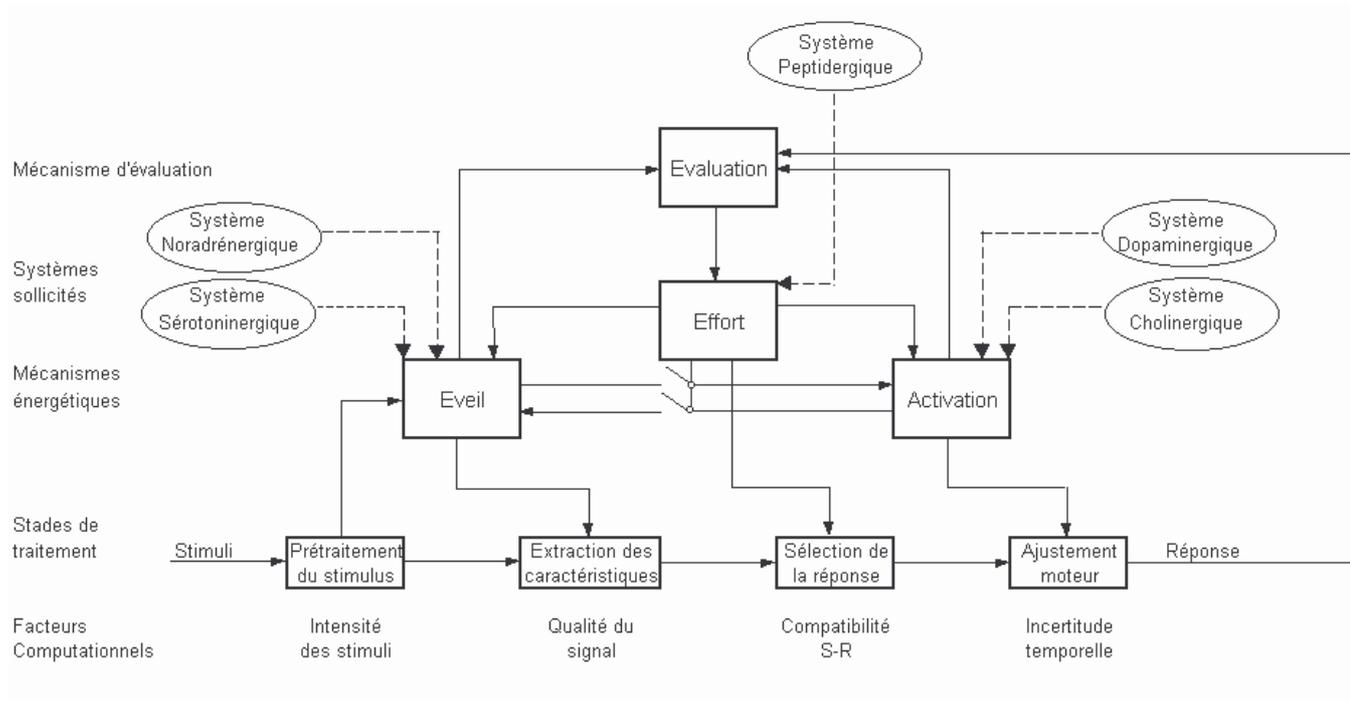


Figure 8. Modèle cognitivo-énergétique du stress et de la performance (modifié d'après Sanders, 1983).

Dans le cadre de ce modèle, Sanders distingue des facteurs computationnels et des facteurs énergétiques. Les facteurs computationnels influencent directement les stades de traitement (e.g., l'intensité du signal, la qualité du signal, la compatibilité stimulus réponse et l'incertitude temporelle). En revanche, les facteurs énergétiques agissent sur la quantité de ressources allouées par les mécanismes d'éveil, d'effort et d'activation. Les facteurs énergétiques agissent donc de façon indirecte sur les stades de traitement par l'intermédiaire des mécanismes énergétiques. D'après Sanders (1983), deux méthodes permettent de déterminer la nature énergétique ou computationnelle d'un facteur expérimental. La première méthode consiste à analyser la forme des distributions de TR en fonction de la manipulation du facteur. La deuxième méthode consiste, quant à elle, à étudier l'évolution de la taille de l'effet d'un facteur manipulé en fonction du temps passé sur la tâche. Ces différentes prédictions seront présentées de façon détaillée dans la partie introductive de la deuxième expérience de ce mémoire.

VI. ANALYSE DE DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION

Définition

L'analyse de distributions de TR est un outil particulièrement intéressant pour étudier le traitement de l'information car il permet de décrire précisément la façon dont un facteur expérimental influence les performances cognitives. Les informations recueillies par l'intermédiaire de cette méthode sont beaucoup plus fines que de simples indices de tendance centrale tels que la moyenne ou la médiane. En effet, l'analyse des distributions de TR offre une vision globale de l'ensemble des TR recueillis au cours de différentes conditions expérimentales. L'analyse de la forme des distributions permet notamment d'évaluer si un changement observé au niveau du TR moyen, entre deux conditions expérimentales, résulte d'un décalage de la courbe (l'ensemble des valeurs de TR étant affecté) (cf. Figure 9A versus Figure 9C) ou si ce changement est seulement dû à une modification de certains types d'essais (e.g., effet sur la composante lente, cf. Figure 9A versus Figure 9B).

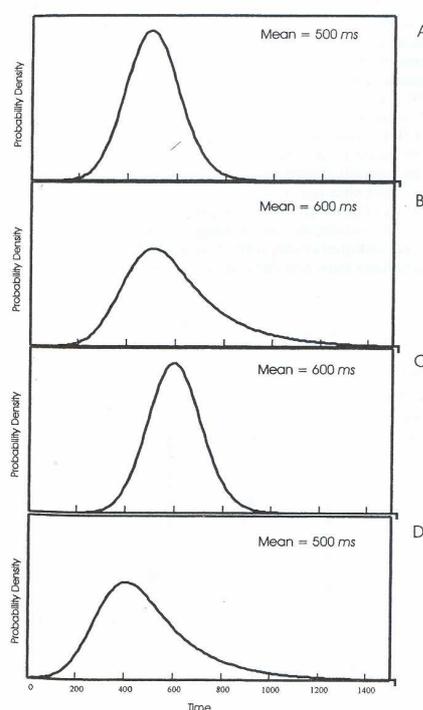


Figure 9. Changements équivalents au niveau du temps de réaction moyen résultant soit d'un allongement de la queue de la distribution (B), soit d'un décalage de la distribution (C), et effets compensés (D) (Spieler, Balota & Faust, 2000).

Au-delà du fait que l'analyse de distributions permet d'appréhender certains aspects ne pouvant être mis en évidence avec des indices de tendance centrale, elle permet parfois d'éviter de commettre des erreurs de Type II. En effet, la manipulation d'un facteur expérimental peut provoquer à la fois un décalage de la courbe et un changement de la forme de la distribution. Dans un cas de figure tel que celui-là, la moyenne peut ne pas être affectée par ces changements (Figure 9A versus Figure 9D ; $\underline{M} = 500$ ms), l'absence de résultat ne reflète alors non pas une absence d'effet du facteur manipulé, mais l'impossibilité de mettre en évidence un effet en utilisant uniquement un indice de tendance centrale.

Techniques d'analyse des distributions de temps de réaction

Deux techniques d'analyse sont généralement utilisées pour appréhender la forme des distributions de TR. La première technique consiste à ajuster une fonction de probabilité théorique aux données expérimentales individuelles collectées essai par essai (Luce, 1986), la deuxième est une technique d'analyse de distributions moyennes par 'vincentisation' (Vincent, 1912).

Ajustement de fonctions de probabilité théorique

Cette première technique permet d'ajuster les TR selon une fonction déterminée *a priori* comme décrivant le mieux les données expérimentales (Ex-Gaussienne, Gamma, LogNormale ou Weibull) (Annexe 2). Pour que cet ajustement soit le plus juste possible, il est préférable de disposer d'un nombre important d'observations comportementales. D'après Cousineau et Larochelle (1997), le choix théorique d'une fonction particulière par rapport à une autre est relativement difficile car les différents ajustements sont en général aussi bons les uns que les autres (voir cependant les réserves de Van Zandt, 2000).

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons choisi d'ajuster les TR selon une fonction Ex-Gaussienne. Utilisée pour la première fois par McGill (1963), la distribution Ex-Gaussienne est la convolution d'une distribution normale Gaussienne et d'une distribution Exponentielle. L'ajustement des données chronométriques individuelles selon une fonction Ex-Gaussienne permet donc de caractériser les distributions de TR en fonction de trois paramètres : Mu (μ) et Sigma (σ) correspondent respectivement à la moyenne et à la variance

de la composante normale, et Tau (τ) correspond à la moyenne de la composante exponentielle (Figure 10). Grossièrement, Mu et Sigma caractérisent la partie principale de la distribution (i.e., les TR courts), tandis que Tau reflète la queue de la distribution (i.e., composante lente).

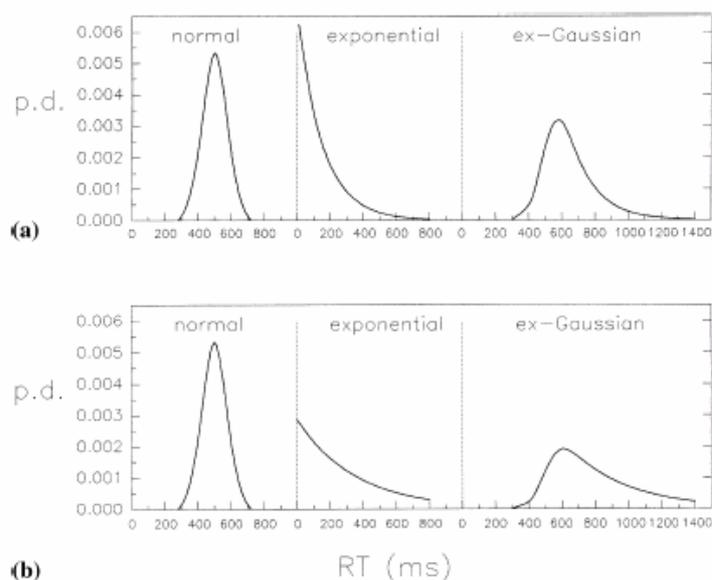


Figure 10. Fonctions de densité de probabilité (p.d.) de deux distributions normales avec $\mu = 500$ ms et $\sigma = 75$ ms ((a), (b)), de deux distributions exponentielles avec $\tau = 150$ ms (a) et $\tau = 350$ ms (b), et des deux distributions Ex-Gaussiennes de temps de réaction (RT) résultantes (Leth-Steensen, Elbaz & Douglas, 2000).

Technique de ‘vincentisation’

La technique de ‘vincentisation’ proposée par Vincent (1912), puis développée par Ratcliff (1979), repose quant à elle sur l’estimation d’une distribution moyenne représentative de distributions individuelles. Contrairement à l’ajustement de fonctions de probabilité, cette technique d’analyse présente, d’une part, l’avantage d’aborder la forme de la distribution sans présumer de la fonction de probabilité qui décrirait le mieux la distribution de TR, et d’autre part, permet de travailler sur des données réelles et non sur une représentation théorique des données. Par ailleurs, elle peut être appliquée sur un nombre restreint d’observations car la distribution de groupe résultante possède les mêmes caractéristiques de forme que les distributions individuelles de TR.

Ratcliff (1979) a montré que la vincentisation permettait d'obtenir une estimation correcte de la distribution. Cette technique consiste à classer les TR de chaque sujet par ordre croissant, puis à décomposer la distribution de TR en classes de même effectif (quantiles). Le calcul du TR moyen de chaque quantile permet d'obtenir une distribution vincentisée individuelle pour chaque sujet, ainsi qu'une distribution vincentisée de groupe en moyennant les distributions individuelles quantile par quantile. On notera que la technique de vincentisation est le seul moyen d'obtenir une distribution de groupe à partir de distributions individuelles, car il n'est pas correct de moyenner simplement les ordonnées des distributions individuelles pour obtenir une distribution moyenne.

Pour chaque distribution vincentisée, l'indice delta est généralement calculé. Cet indice rend compte à la fois de l'amplitude et du sens de l'effet du facteur manipulé pour chaque quantile. Exprimé en millisecondes, l'indice delta représente l'écart entre les distributions de TR de deux conditions expérimentales rapporté à la moyenne du TR moyen obtenu pour ces deux conditions ($\Delta = TR_1 - TR_2$ en fonction de $(TR_1 + TR_2) / 2$). Cet indice reflète la dynamique de l'effet du facteur manipulé. Lorsque l'indice delta ne diffère pas d'un quantile à l'autre, on considère que l'effet du facteur manipulé est le même pour l'ensemble des TR. À l'opposé, lorsque des changements significatifs sont observés en fonction des quantiles, on considère que l'amplitude de l'effet du facteur manipulé varie en fonction de la vitesse de la réponse (pour un exemple, voir Figure 11).

L'exemple (ci-dessous) illustre, l'utilisation de l'analyse des distributions et l'intérêt de l'indice delta dans la compréhension des résultats. Dans le cadre de cette étude, Possamaï, Burle, Osman et Hasbroucq (2002) ont manipulé la nature des informations partielles fournies au sujet avant l'exécution de la réponse. Le sujet devait répondre avec l'index ou le majeur de la main droite ou de la main gauche en fonction d'un stimulus donné. Lorsqu'elles étaient données, les informations préalables concernaient soit la latéralité de l'effecteur, soit le doigt à utiliser. L'indice delta présenté sur ce graphique met clairement en évidence que lorsque l'information partielle concerne la main, le bénéfice est de petite taille mais reste constant sur l'ensemble de la distribution (2-4 msec). Par contre, lorsque l'information préalable concerne le doigt, le bénéfice est sensiblement le même au niveau des temps moteurs courts, mais il est beaucoup plus important au niveau des temps moteurs longs (18 msec). Au regard de la Figure 11, on notera que l'analyse de distribution peut également être utilisée afin d'étudier

les distributions de variables chronométriques fractionnées telles que le ‘temps moteur’ ou le ‘temps pré-moteur’. Nous reviendrons en détail sur ces deux composantes dans le chapitre suivant.

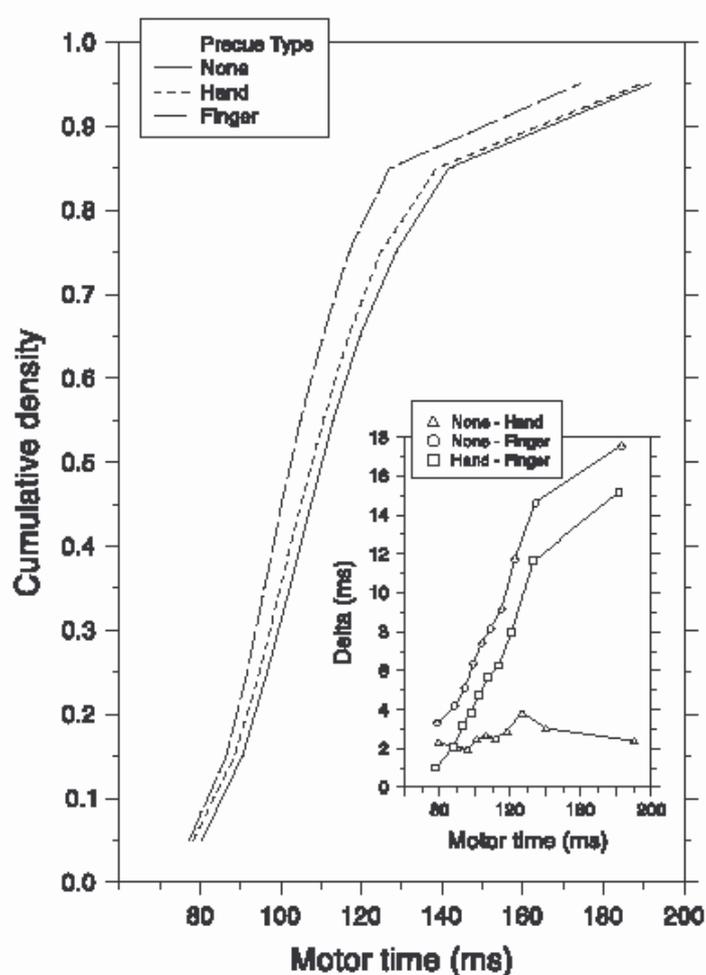


Figure 11. Distributions de temps moteur (Possamaï *et al.*, 2002).

Représentations graphiques des distributions

Classiquement, les distributions de TR sont graphiquement présentées sous la forme de fonction de densité de probabilité (‘probability density function’ ; PDF) ou sous la forme de fonction de densité cumulée (‘cumulative density function’) (Figure 12). Dans le cadre de ce mémoire, l’ensemble des représentations graphiques sera présenté sous la forme de

fonction de densité cumulée, c'est à dire la probabilité cumulée d'apparition d'une valeur de TR en fonction de la latence.

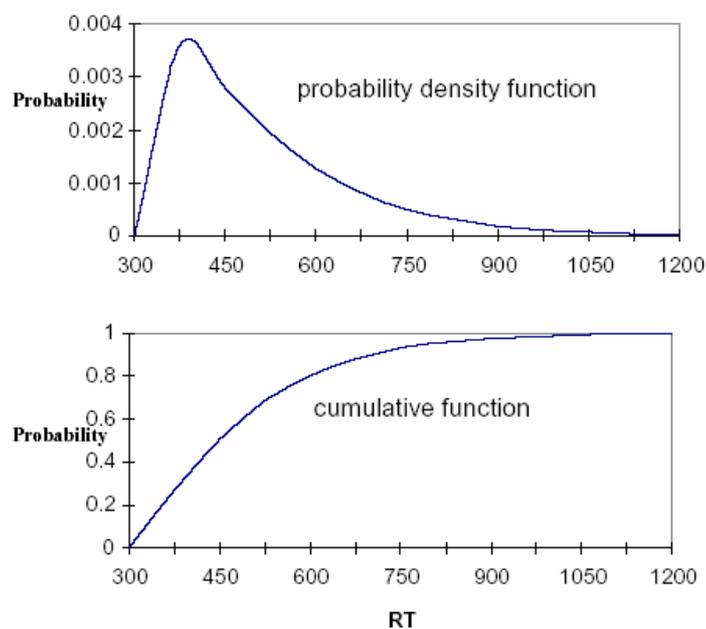


Figure 12. Représentations graphiques d'une distribution sous la forme d'une fonction de densité de probabilité ('probability density function') et sous la forme d'une fonction de densité cumulée ('cumulative function') (Cousineau & Larochelle, 1997).

VII. TECHNIQUE ELECTROMYOGRAPHIQUE ET LOGIQUES D'INFERENCE

Définition

L'électromyographie est une technique permettant d'enregistrer l'activité électrique musculaire. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous intéresserons uniquement aux enregistrements dit 'de surface' c'est à dire aux enregistrements effectués par l'intermédiaire d'électrodes disposées sur la peau au-dessus du muscle auquel on s'intéresse. Les données recueillies par électromyographie reflètent la sommation algébrique des potentiels élémentaires qui se propagent dans les fibres musculaires. Ils représentent donc le recrutement d'une partie des unités motrices du muscle concerné.

Logiques d'inférence

En chronométrie mentale, l'électromyographie est un outil particulièrement intéressant car il permet d'effectuer un certain nombre d'inférences sur la base de l'apparition d'un changement physiologique. D'autres techniques électrophysiologiques telles que les potentiels évoqués cérébraux, l'activité neuronale unitaire, la réflexologie et la stimulation magnétique transcranienne peuvent également être utilisées dans le cadre de cette logique. Le principe est de combiner les méthodes de TR à ces différentes techniques d'analyses, afin de bénéficier d'indices intermédiaires concernant la nature des opérations effectuées et la façon dont elles se déroulent. Les résultats peuvent être interprétés en fonction de deux logiques : la logique événementielle et la logique chronométrique (Hasbroucq, 2001 ; Hasbroucq, Burle, Bonnet, Possamaï & Vidal, 2002).

La logique événementielle repose sur un certain nombre de présupposés théoriques permettant d'étudier l'architecture fonctionnelle du traitement de l'information. Dans le cadre d'un modèle préalablement défini, certaines inférences peuvent être faites moyennant l'élaboration préalable de 'fonctions d'indexation', c'est à dire de relations hypothétiques entre l'activité électrophysiologique analysée et le traitement de l'information. Par exemple, au cours d'une tâche de TR, on considère généralement que l'activité EMG des muscles agonistes impliqués dans la réponse requise indexe la mise en œuvre des opérations tardives permettant l'exécution de la réponse (Hasbroucq *et al.*, 2002). La latence du pic de la

composante P300 reflète, quant à elle, la durée des processus perceptifs et serait relativement indépendante des étapes suivantes (Verleger, 1997).

La logique dite chronométrique utilise, quant à elle, l'apparition d'activités électrophysiologiques comme des indices intermédiaires sur le traitement. Ainsi, le TR peut être décomposé en plusieurs intervalles, correspondant à des séquences de processus distincts, par rapport à un changement d'activité électrophysiologique liée au traitement de l'information en cours. Par exemple, le début de l'activité EMG du muscle agoniste impliqué dans la réponse peut être utilisé pour fractionner le TR en deux composantes chronométriques, reflétant chacune des processus distincts : le 'temps pré-moteur' et le 'temps moteur' (Botwinick & Thompson, 1966 ; Weiss, 1965 cités par Hasbroucq *et al.*, 2002). Le temps pré-moteur (TPM) correspond à l'intervalle de temps séparant la présentation du signal impératif de réponse et l'arrivée des potentiels d'action au niveau de la plaque motrice des fibres musculaires impliquées dans la réponse. Le temps moteur (TM) correspond quant à lui à l'intervalle de temps séparant le début de l'activité EMG et l'amorce d'une réponse motrice (Figure 13).

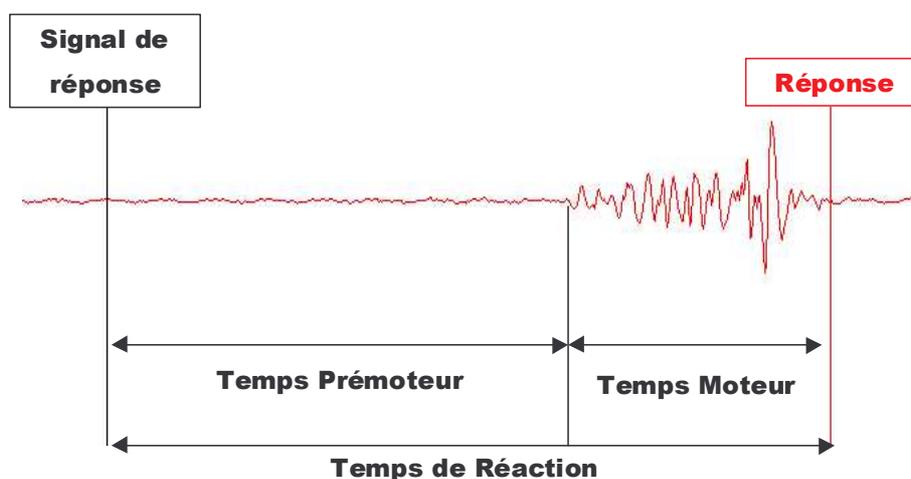


Figure 13. Tracé électromyographique et fractionnement du Temps de Réaction en deux composantes chronométriques : le Temps Pré-moteur et le Temps Moteur.

Si on considère que pour chaque essai la somme des deux composantes chronométriques est égale au TR global ($TR = TPM + TM$), et que la manipulation d'un facteur expérimental affecte le TR global, alors les effets de cette manipulation peuvent apparaître au niveau de chacune des deux composantes chronométriques : $TR_1 - TR_2 = (TPM_1$

- $TPM_2) + (TM_1 - TM_2)^1$. Si la manipulation d'un facteur affecte le TPM alors ce résultat suggère que la manipulation du facteur affecte les étapes sensorielles et centrales de traitement (Hasbroucq *et al.*, 2002). Au contraire, si la manipulation d'un facteur affecte le TM ce résultat suggère alors fortement que la manipulation du facteur affecte la vitesse de la contraction musculaire et une partie des opérations tardives permettant l'exécution de la réponse (Hasbroucq *et al.*, 1995). Selon différents auteurs, ces opérations correspondent aux étapes d'exécution motrice (Taylor, 1966 cité par Van der Molen, Bashore, Halliday & Callaway, 1998), de programmation motrice (Sanders, 1990) et d'ajustement moteur (Sanders, 1980). Enfin, si la manipulation d'un facteur affecte les deux composantes alors il est vraisemblable que la manipulation du facteur affecte la durée des étapes sensorielles et centrales de traitement, ainsi que la durée des opérations tardives permettant l'exécution de la réponse.

Technique d'indexation

Toutefois, une faiblesse éventuelle de l'utilisation du fractionnement du TR en fonction de changements électrophysiologiques concerne la précision avec laquelle l'apparition des événements est déterminée (Van Boxtel, Geraats, Van den Berg-Lenssen & Brunia, 1993). Étant donné les présupposés théoriques, l'utilisation d'une méthode précise et rigoureuse est nécessaire pour pouvoir faire une interprétation correcte des données expérimentales recueillies. Malgré la possibilité d'utiliser des algorithmes automatiques permettant un traitement rapide des résultats, nous avons préféré utiliser une méthode de détection visuelle essai par essai permettant une détection plus fiable et plus précise afin de s'affranchir au maximum d'éventuelles erreurs d'interprétation pouvant être liées aux traitements des données (Van Boxtel *et al.*, 1993). En effet, étant donné que les algorithmes automatiques détectent la première activité EMG apparaissant sur le tracé, ils ne permettent pas de prendre en considération l'apparition d'activités EMG pouvant survenir avant le déclenchement de la réponse. Or dans le cadre de cette étude, nous avons considéré que seuls les essais ayant aboutis à la production d'une réponse correcte et étant caractérisés par l'apparition d'une unique bouffée EMG résultaient d'un traitement conforme à la logique de chronométrie mentale. Les erreurs et les essais laissant apparaître une activation EMG sous-

¹ TR_1 , TPM_1 et TM_1 , d'une part, et TR_2 , TPM_2 et TM_2 , d'autre part, correspondent aux valeurs de TR, TPM et TM à l'issue de la manipulation du facteur expérimental de la condition 1 à la condition 2.

liminaire avant l'activation du muscle impliqué dans la réponse correcte ont systématiquement été rejetés. En effet, bien que l'objet de notre étude ne soit pas centré sur l'occurrence de réponses partielles (activité EMG précédant l'apparition de l'activité EMG responsable du déclenchement de la réponse motrice), les essais pour lesquels une ébauche de réponse était décelable ont été identifiés et exclus de l'analyse. Seuls les essais corrects (pure-correct trial ou single electromyographic activity trial) ont été pris en considération. Ces essais correspondaient aux essais pour lesquels l'enregistrement EMG était caractérisé par l'apparition d'une unique bouffée EMG, apparaissant au niveau du muscle impliqué dans la réponse attendue (tracé identique au Figure 13). Sur la base des caractéristiques des tracés EMG enregistrés, quatre types d'essais ont été exclus de l'analyse : les essais 'Incorrect-Correct', les essais 'Correct-Incorrect', les activations simultanées et les essais 'Correct-Correct'. Cette classification a été effectuée en fonction de la localisation (activation au niveau de l'effecteur impliqué dans la réponse correcte ou incorrecte) et en fonction du moment d'apparition de l'activation EMG sous-liminaire.

Les essais '*Incorrect-Correct*' correspondent à des essais laissant apparaître une activation EMG sous-liminaire du muscle impliqué dans la réponse incorrecte avant l'activation du muscle impliqué dans la réponse correcte (Figure 14).

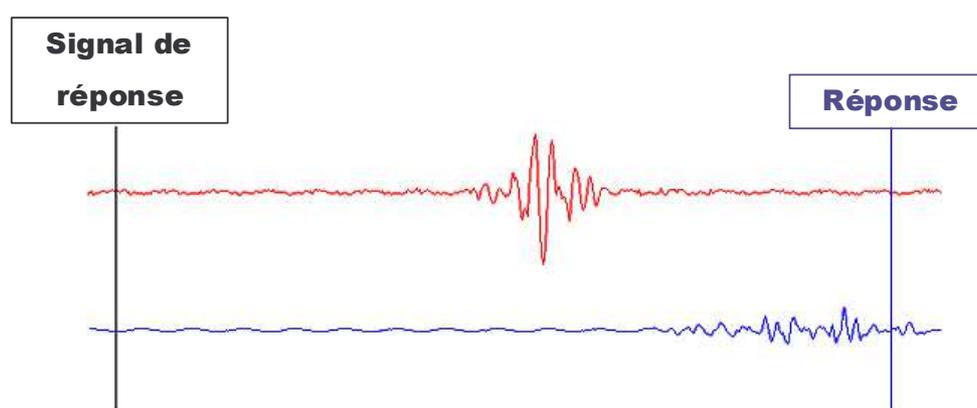


Figure 14. Tracé électromyographique d'un essai '*Incorrect-Correct*' laissant apparaître une activation EMG sous-liminaire du muscle impliqué dans la réponse incorrecte (tracé du haut) avant l'activation du muscle impliqué dans la réponse correcte (tracé du bas).

La proportion de ce type d'activation est particulièrement importante lorsqu'un conflit apparaît entre la localisation spatiale du stimulus et de la réponse (Hasbroucq, Possamaï, Bonnet & Vidal, 1999) et lorsque des distracteurs incompatibles sont présentés en même

temps que la cible (Eriksen, Coles, Morris & O'Hara, 1985). En effet, malgré la production d'une réponse motrice correcte, une activation EMG sous-liminaire du muscle impliqué dans la réponse alternative à la réponse requise est souvent décelable. Le TR est plus long pour les essais au cours desquels se produisent ces activations qu'au cours des essais 'pure-correct'. Ces résultats suggèrent que l'activation EMG du muscle impliqué dans la réponse incorrecte reflète une ébauche d'erreur stoppée avant l'atteinte du seuil de déclenchement de la réponse (Burle & Bonnet, 1999). L'allongement du TR s'expliquerait alors par l'intervention d'un contrôle exécutif en ligne permettant la détection, l'inhibition et la correction d'erreurs partielles (Burle, Possamaï, Vidal, Bonnet & Hasbroucq, 2002). Récemment, les résultats obtenus par Allain, Carbonnell, Burle, Hasbroucq et Vidal (sous presse) suggèrent également l'existence d'un contrôle exécutif en ligne au cours d'un essai provoquant une diminution de la bouffée EMG et un allongement du TM. Etant donné les conséquences de l'apparition d'une double activation EMG sur les différentes composantes chronométriques, les essais 'Incorrect-Correct' ont été exclus du traitement des données.

Malgré le fait que seules les activations sous-liminaires de type '*Incorrect-Correct*' semblent affecter le TR (Smid, Mulder & Mulder, 1990), nous avons également préféré rejeter les essais 'Correct-Incorrect', les activations simultanées et les essais 'Correct-Correct'. Les essais '*Correct-Incorrect*' correspondent aux essais pour lesquels une première activation EMG du muscle impliqué dans la réponse correcte était observée, suivie d'une deuxième activation du muscle impliqué dans la réponse incorrecte ne provoquant pas le déclenchement d'une erreur (Figure 15).

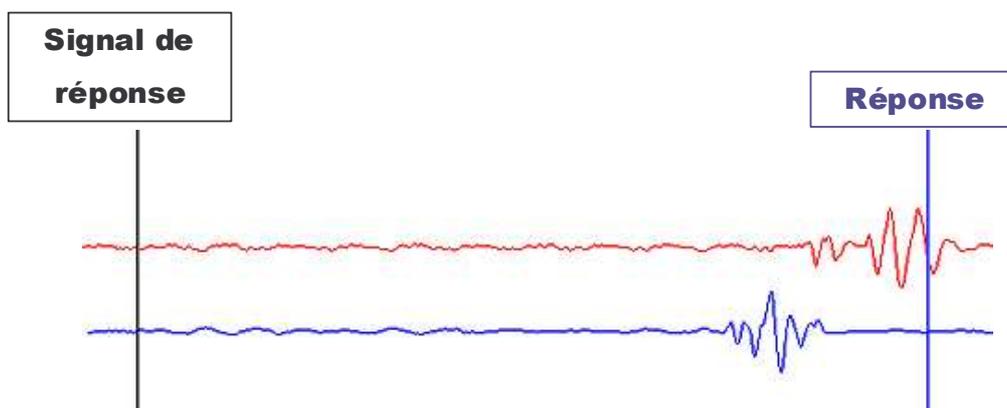


Figure 15. Tracé électromyographique d'un essai '*Correct-Incorrect*' laissant apparaître une première activation électromyographique du muscle impliqué dans la réponse correcte (tracé du bas), suivie d'une deuxième activation du muscle impliqué dans la réponse incorrecte ne provoquant pas le déclenchement d'une erreur (tracé du haut).

Les activations simultanées correspondent aux essais pour lesquels deux activations EMG apparaissent de façon simultanée au niveau du muscle impliqué dans la réponse correcte et au niveau du muscle impliqué dans la réponse incorrecte. Enfin, les essais que nous avons arbitrairement nommés '*Correct-Correct*' correspondent aux essais pour lesquels plusieurs activations successives du muscle impliqué dans la réponse correcte étaient observées (Figure 16).

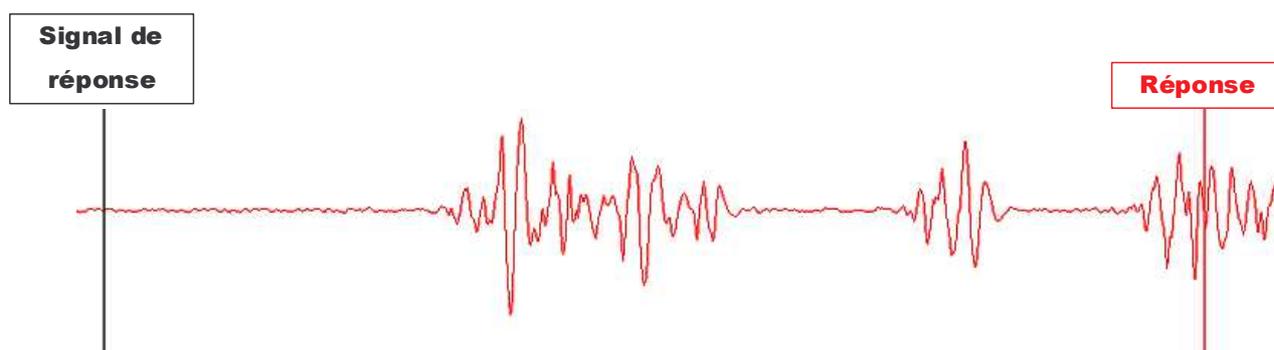


Figure 16. Tracé électromyographique d'un essai '*Correct-Correct*' laissant apparaître plusieurs activations successives du muscle impliqué dans la réponse correcte.

Analyse de la forme du tracé électromyographique

Lorsque la technique de fractionnement du TR met en évidence l'influence d'un facteur expérimental sur le TM, l'enregistrement de l'électromyogramme offre parfois la possibilité d'effectuer une analyse complémentaire sur la forme de la bouffée EMG. L'analyse de la forme du tracé EMG est une technique particulièrement intéressante car elle permet de caractériser de façon plus précise l'influence d'un facteur sur la composante motrice. En effet, d'après les caractéristiques du tracé EMG, un certain nombre d'inférences peuvent être faites notamment par rapport à la vitesse de recrutement des unités motrices et à l'efficacité de la commande cortico-spinale (Hasbroucq *et al.*, 1995 ; Possamaï *et al.*, 2002 ; Allain *et al.*, sous presse). Cependant, on notera que l'analyse de la forme du tracé EMG n'est pertinente que si les électrodes de surface restent à la même place entre les différentes conditions expérimentales. En effet, un simple décalage dans le positionnement d'une électrode peut suffire à modifier la forme de l'électromyogramme.

Hasbroucq *et al.* (1995) ont utilisé l'angle α du tracé EMG (Figure 17) comme un indice de la vitesse de recrutement des unités motrices. Cet indice correspond à l'angle formé par la ligne de base de l'activité EMG et le segment joignant le point correspondant à l'apparition de l'activité EMG et le point correspondant au pic du tracé EMG rectifié. Pour un même individu, cet indice, déterminé essai par essai, s'avère être corrélé négativement au TM. Les résultats de cette étude suggèrent que l'angle α est un bon indicateur de la vitesse de recrutement des motoneurones : plus le recrutement est rapide, plus l'angle est large. Plus précisément, la raideur de la pente EMG est probablement liée à la variabilité du recrutement des unités motrices : plus la variance est faible (i.e., plus la décharge des motoneurones est synchronisée), plus la pente du tracé EMG est raide (Meijers, Teulings, & Eijkman, 1976; Ulrich & Wing, 1991). L'angle α est donc supposé refléter la qualité de la commande cortico-spinale. Dans le cadre de travaux effectués sur la manipulation d'informations partielles avant l'exécution de la réponse (Possamaï *et al.*, 2002, pour des détails se reporter à la page 35), l'utilisation de l'angle α a permis de préciser l'effet des informations préalables au niveau du TM. L'analyse de la forme du tracé EMG montre que la pente du tracé EMG lors d'une tâche de TRC à 2 éventualités est plus raide que lors d'une tâche de TRC à 4 éventualités. Ce résultat suggère que les changements observés au niveau du TM sont certainement dus à une modification de la vitesse de recrutement des motoneurones. Dans une récente étude, Allain *et*

al. (sous presse) ont montré qu'une modification de la pente descendante du tracé EMG rectifié peut également être observée dans certain cas.

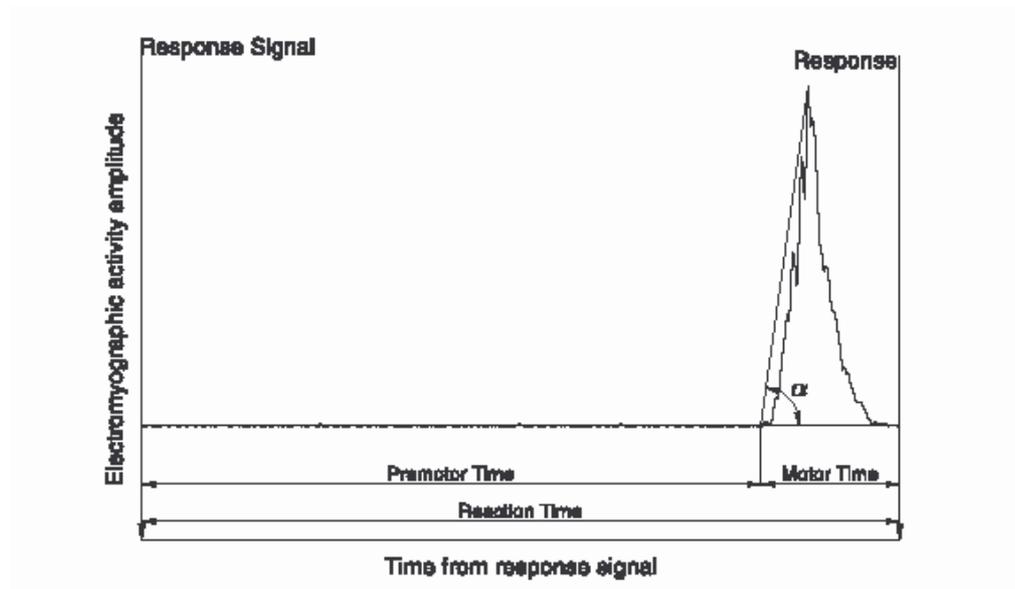


Figure 17. Tracé électromyographique et représentation schématique des composantes chronométriques (temps de réaction, temps pré-moteur et temps moteur) et de l'angle α (Possamaï *et al.*, 2002).

Dans le cadre de ce travail, deux variables dépendantes ont été prises en considération : la pente ascendante du tracé EMG rectifié et la surface sous la courbe EMG rectifiée. L'analyse de la forme du signal électromyographique a été effectuée par l'intermédiaire du logiciel de traitement du signal Brain Vision. Dans un premier temps, la ligne de base des tracés EMG de chaque sujet, dans chaque condition expérimentale a été corrigée sur la base des valeurs enregistrées au cours des 100 msec précédant l'apparition du signal EMG. Le traitement a ensuite été effectué sur les données enregistrées à l'intérieur d'une fenêtre de temps dont la largeur a été déterminée objectivement par rapport au TM moyen. En effet, celle-ci correspondait au TM moyen de l'ensemble des sujets toutes conditions confondues. Lors de l'analyse du signal EMG, nous avons considéré que la première moitié de cette fenêtre de temps indexait la partie ascendante de la courbe et que la deuxième moitié reflétait la partie descendante du tracé EMG rectifié.

La pente ascendante du tracé EMG rectifié a été calculé par l'intermédiaire d'une droite de corrélation calculée avec la méthode des moindres carrés. La surface sous le tracé

EMG a quant à elle été déterminée automatiquement grâce à un logiciel de traitement du signal (Regress'tout).

Principaux résultats expérimentaux

La technique de fractionnement du TR a déjà été utilisée afin de préciser l'effet de l'intensité du signal, de la compatibilité stimulus-réponse, de la composition du répertoire moteur, du nombre d'alternatives et de l'incertitude temporelle. Appliquée dans le cadre d'études pharmacologiques, cette logique a également permis de préciser l'effet de la fluvoxamine et de la levodopa chez l'homme (cf. Tableau 1).

Au cours d'une tâche de TR, où le sujet était invité à répondre, après une période préparatoire courte (500 msec) ou longue (2500 msec), avec les doigts de la même main (répertoire intra-manuel) ou avec les doigts des deux mains (répertoire inter-manuel), Hasbroucq *et al.* (1995) ont montré que la composition du répertoire moteur et la durée de la période préparatoire affectent à la fois le TPM et le TM. De la même façon, en manipulant le nombre d'alternatives de réponses possibles, en fonction du stimulus présenté par l'intermédiaire d'une technique de 'precueing', Possamaï *et al.* (2002) ont observé un effet du nombre d'alternatives sur les deux composantes du TR. Les résultats concernant la composition du répertoire moteur (Hasbroucq *et al.*, 1995) ont été confirmés ensuite par une étude de Rihet, Hasbroucq, Blin et Possamaï (1999) visant à préciser la localisation de l'effet de la fluvoxamine (inhibiteur de la recapture de la sérotonine). Dans cette dernière étude, trois facteurs cognitifs étaient manipulés (l'intensité du signal, la composition du répertoire moteur et la compatibilité stimulus-réponse). Rihet *et al.* (1999) ont observé un effet de l'intensité du signal et de la compatibilité stimulus-réponse sur le TPM, une diminution du TM sous fluvoxamine et un effet marginal allant dans le même sens au niveau du TPM. L'effet de la compatibilité stimulus-réponse sur le TPM (Rihet *et al.*, 1999) a également été confirmé par les résultats d'Hasbroucq, Burle, Akamatsu, Vidal et Possamaï (2001). Enfin, dans le cadre d'une autre étude pharmacologique, les résultats observés par Hasbroucq, Tandonnet, Micallef-Roll, Blin et Possamaï (2003) suggèrent que l'administration de levodopa (précurseur dopaminergique) raccourcit le TM.

Composantes du Temps de Réaction	Temps pré-moteur	Temps moteur
Facteurs expérimentaux	<p>Intensité du signal (TPM intensité forte < TPM intensité faible)</p> <p>Compatibilité stimulus-réponse (TPM S-R compatible < TPM S-R incompatible)</p> <p>Complexité du répertoire de réponse (TPM répertoire inter-manuel < TPM répertoire intra-manuel)</p> <p>Incertitude temporelle (TPM PP courte < TPM PP longue)</p> <p>Nombre d'alternative (TPM 2 alternatives < TPM 4 alternatives)</p> <p>Fluvoxamine (effet marginal) (TPM Fluvoxamine < TPM Placebo)</p> <p style="text-align: center;">–</p>	<p style="text-align: center;">–</p> <p style="text-align: center;">–</p> <p>Complexité du répertoire de réponse (TM répertoire inter-manuel < TM répertoire intra-manuel)</p> <p>Incertitude temporelle (TM PP courte < TM PP longue)</p> <p>Nombre d'alternative (TM 2 alternatives < TM 4 alternatives)</p> <p>Fluvoxamine (TM Fluvoxamine < TM Placebo)</p> <p>Lévodopa (TM Lévodopa < TM Placebo)</p>

Tableau 1. Tableau récapitulatif des différents résultats mis en évidence par l'intermédiaire de la technique de fractionnement du temps de réaction.

VIII. ORIENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

S'il est aujourd'hui établi que la réalisation d'un exercice physique peut induire une amélioration des performances cognitives, les mécanismes et les processus impliqués dans ce phénomène de facilitation restent malgré tout indéterminés.

La finalité de ce travail de recherche est de préciser et de localiser cet effet de facilitation au sein de la chaîne de traitement de l'information. Cet objectif ne pouvant être atteint sans l'observation préalable d'une amélioration des performances cognitives, les protocoles expérimentaux ont été mis en place afin de bénéficier de conditions particulièrement favorables à l'observation d'un phénomène d'amélioration des performances cognitives. Tout au long de ce travail, nous avons attaché une attention particulière au contrôle de l'intensité et de la durée de la sollicitation physiologique, au choix de la tâche cognitive, au moment de passation de la tâche cognitive par rapport à la période d'exercice et aux caractéristiques individuelles des sujets.

Les différentes expériences présentées dans le cadre de ce mémoire reposent sur différentes méthodes d'inférence : la méthode des facteurs additifs, l'analyse de distributions de TR, l'évolution du TR en fonction du temps passé sur la tâche et le fractionnement du TR en deux composantes (TPM et TM). Par ailleurs, un certain nombre de variables dépendantes a également été utilisé afin de faciliter l'interprétation des résultats et de bénéficier d'indices complémentaires permettant de préciser et de localiser l'effet de l'exercice : la fréquence critique de fusion et l'évaluation des sensations subjectives.

L'expérience préliminaire consiste en la traduction d'un questionnaire d'évaluation de sensations subjectives très largement utilisé en psychopharmacologie mais jamais validé en langue française. Bien que cette étude puisse paraître en décalage à première vue avec le reste du document, il nous a semblé important de la faire figurer dans ce travail car l'objet de cette étude est de mettre en place un outil valide pouvant être utilisé par la suite au cours de protocoles expérimentaux sur l'exercice.

Au regard des principales hypothèses explicatives avancées dans différents travaux de la littérature, deux premières expériences ont été mises en place. L'objectif de la première expérience était de tester l'influence sélectivement de l'exercice au niveau de l'étape d'extraction des caractéristiques, de l'étape de sélection de la réponse et de l'étape

d'ajustement moteur (Sanders, 1983). En effet, l'ensemble des résultats de la littérature suggérant une élévation du taux de catécholamines centrales et plasmatiques (e.g., Meusen & De Meirleir, 1995 ; Meusen, Piacentini & De Meirleir, 2001 ; Chmura *et al.*, 1994), une augmentation de l'effort investi dans la tâche au cours de l'exercice (Delignières & Brisswalter, 1994) et un effet périphérique moteur de l'exercice (Arcelin *et al.*, 1998), ces trois étapes de traitements étaient susceptibles d'être affectées par la réalisation d'un exercice physique.

L'objectif de la deuxième expérience était, d'une part, d'utiliser la technique d'analyse de distribution afin de préciser l'effet de l'exercice au niveau des différents moments de la distribution de TR et, d'autre part, de mettre à l'épreuve les prédictions de Sanders (1983) concernant l'utilisation de cette méthode.

A partir des résultats des deux précédentes expériences, une troisième expérience reposant sur le fractionnement du TR en deux composantes et sur la manipulation de l'intensité du signal a été réalisée. Face aux résultats encourageant de cette étude, une dernière expérience a été mise en place afin de confirmer ces observations. En effet, les résultats observés étant en contradiction avec l'hypothèse selon laquelle l'exercice affecte les étapes décisionnelles de traitement, le même protocole expérimental a été répliqué au cours d'une tâche de TRS. Par ailleurs, cette dernière expérience tentait de mettre fin à une controverse sur l'effet différencié de l'exercice au niveau du TRC et du TRS.

DEUXIEME PARTIE - EXPERIMENTALE

VALIDATION TRANSCULTURELLE DU QUESTIONNAIRE DE BOND ET LADER (1974)

INTRODUCTION

Les questionnaires d'auto-évaluation présentés sous forme d'échelles visuelles analogiques sont des techniques de mesures couramment utilisées en psychopharmacologie. Ce type de tests psychologiques est particulièrement intéressant car il permet non seulement d'appréhender les effets de substances psychoactives, mais également de suivre l'évolution et les fluctuations des effets actifs de certaines substances au cours du temps. L'utilisation de ce type d'auto-évaluation est rapide et peu contraignante pour les sujets. De plus, l'utilisation d'une échelle visuelle non graduée facilite la production d'une réponse et évite les distributions artificielles de réponses positives et négatives. Norris (1971) propose un questionnaire psychologique, composé de 16 sous-échelles de 100 mm chacune afin de mesurer les effets de substances psychotropes chez l'homme. Sur la base des propositions de Norris (1971), Bond et Lader modifient cet outil en 1974 et mettent en place la version finale du *16-100 mm Visual Analog Scale* (Figure 18). Dans le cadre de mon travail de DEA (Davranche & Audiffren, 2002a), nous avons utilisé une version française de ce questionnaire qui malgré son utilisation courante s'avère *a posteriori* n'avoir jamais été validée en langue française. Le fait qu'aucun outil en langue française, utilisant une échelle visuelle analogique, ne permette d'appréhender les différents affects mesurés par l'intermédiaire du questionnaire de Bond et Lader (1974), nous a incité à effectuer une validation transculturelle de ce questionnaire de sensations subjectives. L'objectif de cette expérience préliminaire est d'obtenir un outil valide en langue française afin d'évaluer les effets de l'exercice physique sur l'état de vigilance subjective des sujets.

Le questionnaire 16-100 mm de Bond et Lader (1974) est composé de 16 items en relation avec la fatigue physique et mentale, l'humeur, l'attention et le niveau d'éveil du sujet. Chacun des 16 items apparaît sous la forme de deux adjectifs antagoniques, séparés par une

ligne de 100 millimètres (e. g., Alert-Drowsy). Pour des raisons de contre-balancement du questionnaire, les adjectifs antagoniques sont repartis de façon à ce qu'il y ait autant d'adjectifs connotés positivement et négativement de chaque côté du continuum. Ainsi, les adjectifs connotés positivement sont situés à droite pour les items 4, 6, 8, 9, 10, 12, 14 et 16 et à gauche pour les items 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13 et 15. Les consignes données au sujet lors de la passation du questionnaire sont d'évaluer, dans l'instant présent, l'état d'humeur dans lequel il se trouve en plaçant un trait perpendiculaire sur chacune des 16 échelles analogiques.

La distance séparant la réponse graphique produite de la fin de la ligne permet d'évaluer la puissance de chaque sensation subjective. Pour les items 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13 et 15, le score de chaque item est mesuré en partant de l'extrémité droite de la ligne jusqu'à la marque apposée par le sujet. Pour les items 4, 6, 8, 9, 10, 12, 14 et 16, la mesure est faite en partant de l'extrémité gauche jusqu'à la marque. Un niveau d'intensité, exprimé en millimètres, est donc associé à chacun des 16 items du questionnaire.

La traduction de ce questionnaire a été effectuée en fonction des différentes étapes de validation préconisées par Vallerand (1989) et Vallerand et Halliwell (1983). Au total, 3 phases expérimentales successives ont été réalisées afin de traduire et de valider le questionnaire. La première étape a consisté en la mise en place et l'évaluation d'une version préliminaire. La deuxième étape a été réalisée afin d'analyser la structure factorielle de la version française du questionnaire (analyse en composante principale ; ACP). Cette étape est particulièrement importante dans le cadre de ce travail, car les résultats de cette analyse seront utilisés ensuite dans le traitement des données expérimentales recueillies au cours de protocoles expérimentaux. La troisième étape a servi à évaluer la validité de construit du questionnaire (analyse factorielle confirmatoire ; AFC).

Figure 18. Version originale du Mood rating scale 16-100 mm (Bond & Lader, 1974) (cette figure n'est pas à l'échelle).

Please rate the way you feel in terms of the dimensions given below.
 Regard the line as representing the full range of each dimension.
 Rate your feelings as they are at the moment.
 Mark clearly and perpendicularly across each line.

<i>Item 1</i>	Alert	_____	Drowsy
<i>Item 2</i>	Calm	_____	Excited
<i>Item 3</i>	Strong	_____	Feeble
<i>Item 4</i>	Muzzy	_____	Clear-headed
<i>Item 5</i>	Well-coordinated	_____	Clumsy
<i>Item 6</i>	Lethargic	_____	Energetic
<i>Item 7</i>	Contented	_____	Discontented
<i>Item 8</i>	Troubled	_____	Tranquil
<i>Item 9</i>	Mentally slow	_____	Quick-witted
<i>Item 10</i>	Tense	_____	Relaxed
<i>Item 11</i>	Attentive	_____	Dreamy
<i>Item 12</i>	Incompetent	_____	Proficient
<i>Item 13</i>	Happy	_____	Sad
<i>Item 14</i>	Antagonistic	_____	Amicable
<i>Item 15</i>	Interested	_____	Bored
<i>Item 16</i>	Withdrawn	_____	Gregarious

ETAPE 1 : ETABLISSEMENT ET EVALUATION DE LA VERSION PRELIMINAIRE

Au cours de cette première étape, trois protocoles ont été mis en place afin d'élaborer une version française préliminaire, de détecter d'éventuels problèmes de compréhension et de vérifier l'équivalence transculturelle de la version traduite par rapport à la version originale.

PROTOCOLE 1.1

Sujets

Dans le cadre de cette étude, six sujets parlants couramment l'anglais, ont été sollicités afin d'obtenir une version française expérimentale du questionnaire à partir de la version originale du questionnaire.

Procédure

La technique de traduction inversée ("back-translation") consistait à faire traduire la version originale du questionnaire en langue française par deux sujets. Les deux traductions ainsi obtenues ont ensuite été de nouveau traduites en anglais par deux autres sujets. L'objectif de cette traduction inversée était de retrouver la version originale à partir des deux versions françaises proposées. La justesse et la précision de la traduction préliminaire étaient évaluées en fonction de la fidélité avec laquelle était reproduite la version originale.

Résultats et discussion

Pour chaque item, la traduction la plus pertinente a été conservée. Les 16 meilleurs items traduits ont ainsi été extraits, puis combinés afin de fournir une seule et unique version française expérimentale du questionnaire. Les items traduits ont été considérés comme satisfaisants lorsque, par traduction inversée, il était possible de retrouver fidèlement les items originaux. Cependant, la traduction renversée de certains items n'a pas abouti à des résultats satisfaisants. Afin de résoudre ce problème et d'éliminer les incertitudes liées aux doubles traductions possibles, deux nouveaux sujets ont été ajoutés afin de disposer d'une troisième proposition. A la fin de cette deuxième étape, la combinaison des trois traductions renversées nous a permis de mettre en place une version expérimentale du questionnaire (Figure 19).

Figure 19. Version expérimentale française du Mood rating scale 16-100 mm (Bond & Lader, 1974) (cette figure n'est pas à l'échelle).

Estimez la manière dont vous vous sentez selon les termes énumérés ci-dessous.
 Considérez chaque ligne comme représentant l'étendue maximale de chaque dimension.
 Évaluez vos sensations telles qu'elles sont en ce moment.
 Marquez clairement cet état d'un trait perpendiculaire sur chaque ligne.

Item 1	Eveillé	_____	Somnolent
Item 2	Calme	_____	Excité
Item 3	Fort	_____	Faible
Item 4	Confus	_____	Lucide
Item 5	Coordonné	_____	Maladroit
Item 6	Léthargique	_____	Energique
Item 7	Satisfait	_____	Insatisfait
Item 8	Soucieux	_____	Tranquille
Item 9	Lent d'esprit	_____	Vif d'esprit
Item 10	Tendu	_____	Détendu
Item 11	Attentif	_____	Rêveur
Item 12	Incompétent	_____	Compétent
Item 13	Heureux	_____	Triste
Item 14	Antagonique	_____	Amical
Item 15	Intéressé	_____	Qui s'ennui
Item 16	Renfermé	_____	Grégaire

Note 1.

Antagonique : adj. Contradictoire, en opposition. Des positions, des points de vue antagoniques.

Grégaire : adj. 1. Se dit des individus d'une population animale qui ont tendance à se grouper. 2. (Souvent péj.) Qui illustre le besoin des hommes de se grouper. Instinct grégaire. Esprit grégaire, qui pousse un individu à se fondre dans un groupe et à en accepter le comportement avec docilité.

PROTOCOLE 1.2

Ce deuxième protocole a été mis en place afin de s'assurer que l'instrument ne pose aucun problème de compréhension suite à la traduction du questionnaire en langue française. Cette vérification se fait dans le cadre d'un pré-test de la version expérimentale sur des sujets appartenant à la population cible.

Sujets

Dans le cadre de ce pré-test de la version expérimentale, réalisé à la Faculté des Sciences du Sport de Poitiers, 16 sujets ont été sollicités afin répondre individuellement à la version expérimentale du questionnaire.

Discussion

Ce pré-test nous a permis de conserver cette version sans modification majeure. Cependant, bien que le questionnaire aie été accepté et compris par la population cible dans sa globalité, deux items ont tout de même posé quelques problèmes de compréhension. Il s'agissait des adjectifs "Antagonique" et "Grégaire". Par soucis de clarté et afin d'écartier toute ambiguïté, il nous a semblé nécessaire d'ajouter la définition de deux adjectifs au dos du questionnaire (Tableau 2, Note 1).

PROTOCOLE 1.3

Un troisième protocole expérimental a été mis en place afin de vérifier l'équivalence transculturelle de la version traduite par rapport à la version originale.

Sujets

Seize sujets, parlants couramment l'anglais, ont répondu aux deux versions du questionnaire. Il s'agissait d'enseignant-chercheurs en STAPS, d'étudiants de 3^{ème} cycle de la faculté des langues de l'université de Poitiers et de traducteurs anglophones.

Procédure

Deux groupes de huit sujets ont été arbitrairement constitués. En fonction du groupe d'appartenance, les deux groupes ont complété les deux questionnaires soit en commençant par la version anglaise du questionnaire, soit par la version française.

Résultats et discussion

Le patron de corrélation pour chacun des items de la version originale anglaise et de la version expérimentale française a été vérifié par l'intermédiaire de tests-t indépendants (test de Student pour groupes appariés). Les résultats non significatifs ($p > .05$) obtenus lors de ces tests indiquent une équivalence entre les items de la version originale et les items de la version expérimentale (Tableau 2).

Item	Echelle	dl	t	Alpha
1	Eveillé / Somnolent	15	0,19	0,85
2	Calme / Excité	15	-1,58	0,13
3	Fort / Faible	15	1,46	0,17
4	Confus / Lucide	15	0,63	0,54
5	Coordonné / Maladroit	15	1,27	0,22
6	Léthargique / Energique	15	-0,98	0,34
7	Satisfait / Insatisfait	15	-1,5	0,15
8	Soucieux / Tranquille	15	-0,62	0,55
9	Lent d'esprit / Vif d'esprit	15	-0,52	0,61
10	Tendu / Détendu	15	0,74	0,47
11	Attentif / Réveur	15	0,89	0,39
12	Incompétent / Compétent	15	0,08	0,94
13	Heureux / Triste	15	-1,61	0,13
14	Antagonique / Amical	15	1,43	0,17
15	Intéressé / Qui s'ennui	15	-1,48	0,16
16	Renfermé / Grégaire	15	0,58	0,57

Tableau 2. Tableau récapitulatif des résultats obtenus aux tests de Student entre les 16 items de la version originale et de la version expérimentale.

ETAPE 2 : ANALYSES DE LA STRUCTURE FACTORIELLE

Cette étape permet d'évaluer la validité de construit de la nouvelle version française du questionnaire, mais également de disposer des informations nécessaires à l'analyse des données (coefficients de pondération, répartition des différents items en fonction des facteurs principaux).

Cette analyse consiste dans un premier temps à identifier, la saturation des différents items sur les facteurs retenus par l'analyse en composante principale et dans un deuxième temps à comparer ces résultats avec ceux obtenus par Bond et Lader (1974). Le coefficient alpha de Cronbach (1951) a également été utilisé afin de juger de l'homogénéité des sous-échelles. Ce coefficient est un indice global pour tous les items d'un même facteur. Il exprime jusqu'à quel point les items forment un ensemble cohérent et mesurent une même caractéristique. Cet indice varie de 0 à 1, une consistance satisfaisante correspond à un score Alpha situé entre .70 et .90 (au-delà, l'indice suggère une certaine redondance entre les items d'une même sous-échelle).

A ce stade de l'étude, les informations issues de l'ACP sont particulièrement importantes car elles vont être utilisées ultérieurement pour le traitement des données expérimentales. A l'intérieur d'un facteur, le poids respectif des différents items est pris en compte. Les scores obtenus pour chaque item sont systématiquement multipliés par leur poids respectif issu de l'ACP. Les valeurs ainsi pondérées sont ensuite additionnées à l'intérieur de chaque facteur. Ces valeurs représentatives de chacun des trois facteurs principaux sont alors utilisées comme variables dépendantes.

Sujets

Afin de garantir l'usage de cet instrument avec tous types de sujets (pathologiques et en bonne santé, sportifs et non sportifs), la procédure de validation a été menée auprès d'un large éventail de 458 sujets âgés de 14 à 81 ans ($M = 27$ ans, $SD = 12$ ans).

Procédure

L'analyse de la structure factorielle du questionnaire a été effectuée par l'intermédiaire d'une analyse en composantes principales (Varimax) sur la base de 458 questionnaires.

Résultats et discussion

Les résultats de l'ACP effectuée sur la version française expérimentale, nous ont permis d'extraire 3 facteurs principaux. Seul les facteurs ayant une valeur propre supérieure à 1 ont été retenus. La variance expliquée par ces trois facteurs représentait 53% de la variance totale et les différents facteurs extraits expliquaient respectivement 33%, 13% et 7% de la variance totale. La consistance interne, mesurée par le Alpha de Cronbach, était respectivement pour chaque facteur de .82, .64 et .75 (Tableau 3).

Facteur	Alpha	Item	Echelle	Poids factoriel
Facteur 1	.82	9	Vif d'esprit / Lent d'esprit	0,736
		6	Energique / Léthargique	0,713
		11	Attentif / Rêveur	0,695
		4	Lucide / Confus	0,644
		1	Eveillé / Somnolent	0,623
		3	Fort / Faible	0,602
		12	Compétent / Incompétent	0,566
		5	Coordonné / Maladroit	0,564
Facteur 2	.64	2	Calme / Excité	0,767
		10	Détendu / Tendu	0,711
		8	Tranquille / Soucieux	0,599
Facteur 3	.75	13	Heureux / Triste	0,727
		16	Grégaire / Renfermé	0,694
		14	Amical / Antagonique	0,616
		7	Satisfait / Insatisfait	0,564
		15	Intéressé / Qui s'ennui	0,507

Tableau 3. Résultats de l'analyse en composantes principales effectuée sur la version expérimentale française du questionnaire (répartition des items en fonction des différents facteurs et poids factoriels des items).

Le regroupement des items a été effectué en fonction du poids factoriel respectif de chaque item sur chacun des trois axes. Nous n'avons retenu que les items saturant sur un facteur avec un poids minimum de .50. Comme l'indique le Tableau 4, les poids des items vont de .51 et .77. Les trois facteurs principaux regroupent respectivement 8, 3 et 5 items.

La structure factorielle de la version française est globalement identique à celle de la version originale. En effet, d'après l'étude de Bond et Lader réalisée en 1974, les 16 items du questionnaire de sensations subjectives peuvent être résumés en trois facteurs principaux : 1) la vigilance, 2) la satisfaction, et 3) la tranquillité. Chaque facteur regroupe respectivement 9, 5 et 2 items et un poids factoriel précis est associé à chaque item (Tableau 4).

Factor	Item	Scale	Loading
Factor 1	1	Alert / Drowsy	0,827
	11	Attentive / Dreamy	0,792
	6	Lethargic / Energetic	0,776
	4	Muzzy / Clear-headed	0,755
	5	Well-coordinated / Clumsy	0,642
	9	Mentally slow / Quick-witted	0,635
	3	Strong / Feeble	0,618
	15	Interested / Bored	0,614
	12	Incompetent / Proficient	0,593
Factor 2	13	Happy / Sad	0,823
	14	Antagonistic / Amicable	0,738
	8	Troubled / Tranquil	0,697
	7	Contented / Discontented	0,677
	16	Withdrawn / Gregarious	0,594
Factor 3	2	Calm / Excited	0,845
	10	Tense / Relaxed	0,677

Tableau 4. Résultats de l'analyse en composantes principales obtenue par Bond et Lader en 1974 (répartition des items en fonction des différents facteurs et poids factoriels des items).

En ce qui concerne la version préliminaire mise en place, le premier facteur est marqué par de fortes corrélations entre 8 items relatifs à la *vigilance* et au *dynamisme*. La structure de ce premier facteur est cohérente avec la structure de la version originale. En effet, parmi ces différents items, on retrouve quasiment l'intégralité du premier facteur extrait de l'ACP de Bond et Lader (1974) (e. g., énergique, lucide, fort, vif d'esprit, compétent, éveillé, coordonné, et attentif). Seul l'item 15 (Intéressé) se distingue de la version précédente. Bien que le poids factoriel de cet item soit relativement important sur ce premier facteur (0.407), cet item explique une part plus importante de variance au niveau du troisième axe extrait de l'analyse en composante principale (0.507). Il a donc été rattaché au facteur 3 plutôt qu'au facteur 1.

Le second facteur est marqué par de fortes corrélations entre 3 items relatifs cette fois à la notion de *tranquillité* (e. g., détendu, calme et tranquille). Bien que la structure de ce deuxième facteur soit assez différente de celle de Bond et Lader (1974), elle reste cohérente car elle regroupe l'ensemble des items composants à l'origine le troisième facteur de l'ACP. En effet, on retrouve l'item 2 (calme) expliquant une bonne partie de la variance de ce deuxième axe ainsi que l'item 10 (détendu). D'après ces résultats, le terme générique *satisfaction* désignant l'ensemble des items du deuxième facteur, n'est plus approprié. Nous avons donc préféré retenir les termes génériques *tranquillité* et de *sérénité* pour rendre compte de la spécificité de ce deuxième axe.

De la même façon, le troisième facteur, regroupant 5 items, s'apparente fortement au deuxième facteur de l'ACP de Bond et Lader (1974) (e. g., heureux, grégaire, amical et satisfait). En effet, la structure de ce facteur est identique mise à part l'exclusion de l'item 8 (Tranquille) et l'inclusion de l'item 15 (Intéressé). Malgré un poids factoriel relativement important sur le troisième facteur, l'item 8 (Tranquille) explique une part de variance plus importante au niveau du deuxième facteur (0.599) qu'au niveau du troisième facteur (0.465). Le troisième axe prend ici une dimension sociale plus importante que dans la version anglaise précédente. Nous avons donc choisi de résumer ce facteur 3 par les termes *sociabilité* et *satisfaction*.

ETAPE 3 : VALIDITE DE CONSTRUIT DU QUESTIONNAIRE

Cette étape a pour objectif de tester la validité de la version française du questionnaire telle qu'elle a été exprimée à partir de l'analyse en composante principale présentée dans la partie précédente. Afin d'ajuster les données recueillies au cours de la passation du questionnaire au modèle théorique, une analyse factorielle confirmatoire a été réalisée. Cette méthode de validation s'appuie sur un raisonnement hypothético-déductif : la démarche consiste à construire un modèle et à formuler des hypothèses quant à l'effet de variables sur certaines autres (Bacher, 1987). Il s'agit ensuite de traduire le modèle conceptuel en modèle mathématique par l'intermédiaire d'équations structurales qui quantifient le poids respectif des différents paramètres (LISREL VI, Jöreskog & Sörbom, 1984). A l'issue de cette analyse, les résultats obtenus doivent répondre au cadre théorique défini au préalable, à savoir distinguer 3 états d'humeur distincts relatifs à la Vigilance et au Dynamisme, à la Tranquillité et à la Sérénité et enfin à la Sociabilité et à la Satisfaction.

Afin d'évaluer la validité du modèle plusieurs indices d'ajustement seront utilisés. Tout d'abord, le rapport $\chi^2 / \text{Degrés de liberté}$ (χ^2/df) indexe la qualité de l'ajustement. On considère cet indice acceptable lorsqu'il est inférieur à 3. L'Adjusted Goodness of Fit Index (AGFI) et le Comparative Fit Index (CFI) représentent une estimation de la variance et de la covariance expliquées par le modèle. Plus ils sont proches de 1, meilleur est l'ajustement. Un ajustement satisfaisant correspond à une valeur supérieure à .90. Le Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) est un indice de l'erreur d'approximation du modèle, un RMSEA inférieur à .05 est considéré comme une bonne approximation. Enfin, l'étendue des résidus standardisés est une mesure de l'étendue standardisée des variances et covariances résiduelles. Des limites se situant entre ± 2 et 3 sont généralement préconisées.

Résultats et discussion

L'analyse factorielle confirmatoire indiquent une adéquation peu satisfaisante entre le modèle théorique et le modèle proposé. Cependant, les indices de la version française sont meilleurs que ceux obtenus à partir de la structure factorielle proposée par Bond et Lader en 1974 (Tableau 5). En effet, la qualité de l'ajustement est meilleure et l'étendue des résidus standardisés est plus petite, les autres indices sont sensiblement identiques.

	χ^2/df	AGFI	CFI	RMSEA	Résidus Standardisés
Bond & Lader (version originale)	6.04	.85	.79	.11	- 6.11 + 9.51
Bond & Lader (version française)	4.96	.83	.83	.09	- 6.65 + 4.91

Tableau 5. Résultats de l'analyse factorielle confirmatoire réalisée sur la structure factorielle de la version française et de la version originale de Bond et Lader (1974).

CONCLUSION

L'objectif de cette expérience était d'obtenir un outil valide en langue française afin d'évaluer les effets de l'exercice physique sur l'état de vigilance subjective des sujets. A l'issue de l'analyse de la structure factorielle du questionnaire, les résultats obtenus au niveau du facteur Vigilance / Dynamisme rendent compte d'une bonne estimation de l'outil de mesure. En effet, le coefficient Alpha de Cronbach de ce facteur est satisfaisant (.82). Ce résultat suggère que les différents items constituant cette sous-échelle sont homogènes et qu'ils forment bien un ensemble cohérent et mesurant la même caractéristique sans toutefois être redondants. De plus, la variance expliquée par ce facteur (33%) représente un pourcentage important de la variance totale expliquée par l'ensemble des trois facteurs (53%). En revanche, les différents indices d'ajustement de l'analyse confirmatoire ne valident pas la pertinence de la validité de construit du questionnaire. Il s'avère que le questionnaire ne permet pas de faire une bonne estimation de l'état de tranquillité et de sociabilité des sujets.

Ce questionnaire ne permettant pas de faire une bonne estimation de l'évolution des sensations subjectives au cours du temps, en dehors de l'estimation de l'état de vigilance, l'utilisation de cet outil dans son intégralité ne nous semble pas conseillée dans le cadre de protocoles expérimentaux. De plus, la validation transculturelle de cet outil déjà existant n'ayant pas abouti, la construction et la validation d'un outil destiné à mesurer l'évolution des sensations subjectives par l'intermédiaire d'une échelle visuelle analogique semble être une perspective de travail pertinente.

APPLICATION DE LA METHODE DES FACTEURS ADDITIFS A L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR L'EXERCICE *

INTRODUCTION

L'objectif de cette première expérience est de mettre en place un protocole expérimental suivant les recommandations méthodologiques de Tomporowski et Ellis (1986) et de Brisswalter et Legros (1996) afin de préciser la nature de l'effet de facilitation des performances cognitives induit par la réalisation d'un exercice physique d'intensité constante et sous-maximale. Nous attacherons donc une attention particulière au contrôle de l'intensité et de la durée de la sollicitation physiologique, au choix de la tâche cognitive, au moment de passation de la tâche cognitive par rapport à la période d'exercice et aux caractéristiques individuelles des sujets. Dans le cadre de ce travail, nous tenterons de localiser l'effet de facilitation induit par la réalisation d'un exercice au niveau du traitement de l'information à l'aide de la MFA de Sternberg (1969, 2001). Les règles d'inférences de cette étude reposent essentiellement sur l'analyse statistique des patrons d'interaction observés entre l'exercice physique et la manipulation de différents facteurs cognitifs.

L'expérience implique la manipulation de trois facteurs cognitifs connus pour affecter des étapes de traitement distinctes (postulat d'influence sélective) : la qualité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et l'incertitude temporelle. La qualité du signal a été manipulée en dégradant le signal impératif visuel de réponse. Classiquement, le TR est plus long lorsque le signal est dégradé que lorsque le signal est intact (Sanders, 1980 ; Sanders, 1983). Cette modification du TR reflète une augmentation de la durée des processus perceptifs et plus précisément un allongement de la durée de l'étape d'extraction des caractéristiques du stimulus. La manipulation de la compatibilité stimulus-réponse était, quant à elle, destinée à affecter les étapes centrales de traitement et plus précisément la durée de

* Davranche, K. & Audiffren, M. (sous presse). An additive factor analysis of the facilitating effects of exercise on information processing. *Journal of Sports Sciences*.

l'étape de sélection de la réponse (Sanders, 1990). Classiquement, lorsque la règle est incompatible le TR est plus long que lorsque la règle est compatible. Dans la condition compatible, le sujet est invité à répondre au stimulus en appliquant une règle naturelle, tandis que dans la condition incompatible, la règle reliant le stimulus et la réponse oblige le sujet à faire appel à une règle de transformation ne correspondant pas spécialement à celle qui s'impose naturellement à lui. L'incertitude temporelle était manipulée par l'intermédiaire de la durée de la période préparatoire. Cette manipulation est connue pour affecter l'étape périphérique d'exécution de la réponse et plus précisément l'étape d'ajustement moteur (Spijkers & Walter, 1985 ; Hasbroucq *et al.*, 1995). Classiquement, le TR est plus court pour une période préparatoire courte que pour une période préparatoire longue. Afin de s'assurer de la robustesse des patrons d'additivité et de favoriser l'observation d'additivités 'vraies', les facteurs expérimentaux ont été manipulés de façon à ce que toutes les conditions expérimentales se croisent entre elles.

Le cadre théorique et les inférences de cette étude n'étant pas sans rappeler l'étude d'Arcelin *et al.* (1998), il semble important de préciser en quoi la réalisation de ce protocole peut apporter des éléments nouveaux et contribuer à l'avancée des travaux scientifiques dans ce domaine de recherche. En effet, l'étude d'Arcelin *et al.* (1998) repose sur la même logique d'inférence que la nôtre, les seules distinctions notables concernent la manipulation des différents facteurs cognitifs et le traitement des données expérimentales recueillies. Toutefois, il nous semble important de répliquer les résultats de cette étude car aucun patron d'interaction n'a pu être mis en évidence au niveau du TR moyen. Les conclusions de ce travail ont uniquement été établies sur la base de l'observation d'une interaction au niveau du troisième quartile de la distribution de TR, ainsi que sur l'interprétation de patrons d'additivité reposant sur l'acceptation de l'hypothèse nulle.

Afin de préciser l'effet de l'exercice dans la chaîne de traitement de l'information, Arcelin *et al.* (1998) ont manipulé trois facteurs cognitifs : l'intensité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et la durée de la période préparatoire au repos et au cours d'un exercice réalisé à 60% de PMA. Les résultats de cette étude ont été analysés par l'intermédiaire d'une analyse de distribution au cours de laquelle, dans chaque condition expérimentale, les performances moyennes du premier quartile étaient comparées à celles du troisième quartile en fonction de l'intensité de l'exercice. Arcelin *et al.* (1998) ont observé

une interaction entre l'exercice et la période préparatoire au niveau du troisième quartile de la distribution. En effet, les sujets sont plus rapides à l'exercice comparativement au repos et l'effet d'amélioration est d'autant plus important que l'incertitude temporelle est élevée. Ce patron d'interaction n'a pas été observé au niveau du premier quartile de la distribution et aucune interaction n'a été mise en évidence entre les différents facteurs expérimentaux au niveau du TR moyen. Les auteurs suggèrent, d'une part, que l'exercice affecte le stade d'ajustement moteur et, d'autre part, qu'il influence uniquement la fin de la distribution de TR (TR longs). Dans le cadre des prédictions de Sanders (1983), ce dernier résultat est interprété comme le reflet d'une action indirecte de l'exercice sur les étapes de traitement de l'information par le biais des mécanismes énergétiques.

Dans un premier temps, il nous semble nécessaire de répliquer, d'une part, l'additivité observée entre l'exercice et la compatibilité stimulus-réponse en manipulant les facteurs cognitifs de façon différente et, d'autre part, le patron d'interaction entre l'exercice et la durée de la période préparatoire au niveau du TR moyen. Dans un deuxième temps, la qualité du signal n'ayant pas été manipulée dans l'étude d'Arcelin *et al.* (1998), il nous semble important de tester l'influence de l'exercice sur le stade d'extraction des caractéristiques du stimulus. Les prédictions concernant la manipulation de l'intensité du signal et les effets de l'exercice sur la distribution de TR feront l'objet de deux autres expériences et seront présentée de façon détaillée dans la suite du document.

Au cours de notre protocole expérimental, trois intensités d'exercice ont été manipulées : repos, 20% et 50% de PMA. La manipulation de ces différentes intensités a été effectuée afin de prendre en considération l'effet négatif de la double tâche et de faciliter ainsi l'interprétation des résultats. En effet, lorsque la tâche cognitive est réalisée en même temps que l'exercice physique, l'interprétation des résultats pose généralement le problème du partage des ressources entre les deux tâches. Si on considère que la tâche cognitive partage les mêmes ressources attentionnelles que la tâche de pédalage, on devrait observer une dégradation de la performance pour une seule ou pour les deux tâches (Abernethy, 1988 ; Bardy, 1991). Dans une étude antérieure Brisswalter *et al.* (1994) ont montré que les phénomènes de facilitation des performances cognitives n'interviennent qu'à partir d'une intensité seuil établie à 40% de PMA. On peut supposer qu'à 20% de PMA aucune amélioration de la performance ne devrait être observée, en revanche l'effet négatif de la

double tâche devrait engendrer une dégradation du TR. Dans le cadre de ces inférences, la comparaison entre les performances obtenues au repos et à 20% de PMA devrait nous permettre d'estimer les conséquences de la réalisation des deux tâches de façon simultanée. De plus, le coût attentionnel d'une tâche de pédalage restant stable avec l'augmentation de la charge musculaire pour des sujets en bonne condition physique (Audiffren, Brisswalter, Brandet & Bosquet, 1998), la comparaison entre les performances obtenues à 20% et à 50% de PMA devrait refléter essentiellement l'effet de facilitation induit par l'exercice physique.

Sur la base des résultats d'une précédente étude (Davranche & Audiffren, 2002a), le protocole expérimental a été conçu de façon à contrôler la variabilité intra-individuelle liée à l'utilisation d'un protocole à mesures répétées se déroulant sur plusieurs jours. Etant donné que l'effet de facilitation induit par l'exercice est un effet de faible amplitude, cette variabilité qui n'est pas liée à la manipulation du facteur expérimental manipulé peut suffire à masquer l'effet de l'exercice. Si ce problème méthodologique est pris en considération *a priori*, certaines précautions peuvent être prises afin d'écartier cette variabilité inhérente au protocole, la seule condition étant de disposer de performances de référence pour chaque session expérimentale.

Un certain nombre de variables dépendantes ont également été utilisées dans le cadre de cette étude afin d'étudier l'effet de facilitation de l'exercice avec une autre logique que la MFA. La fréquence critique de fusion et l'évaluation des sensations subjectives des sujets par l'intermédiaire de questionnaires, nous semble effectivement fournir des indices complémentaires tout à fait intéressants pour faciliter l'interprétation des résultats observés au niveau du TR.

Considérant, d'une part, que la tâche cognitive partage les mêmes ressources attentionnelles que la tâche de pédalage et, d'autre part, que ce coût n'augmente pas avec l'intensité de la charge, on pourrait s'attendre à observer 1) une dégradation de la performance cognitive due à l'ajout d'une tâche de pédalage entre la condition repos et 20% de PMA et 2) une amélioration de la performance cognitive induite par l'effet de facilitation de l'exercice entre la condition 20% et 50% de PMA. Par ailleurs, la facilitation des performances cognitives observée au cours de l'exercice étant généralement associée à une élévation du niveau d'éveil et/ou d'activation, nous nous attendons également à observer une augmentation

de la fréquence critique de fusion et une intensification des sensations subjectives de vigilance et de vigueur des sujets immédiatement après l'exercice.

Nous tenterons également de déterminer si l'exercice influence sélectivement le traitement de l'information au niveau de l'étape d'extraction des caractéristiques physiques du stimulus, de l'étape de sélection de la réponse et de l'étape d'ajustement moteur (Sanders, 1983). L'ensemble des résultats de la littérature suggérant une élévation du taux de catécholamines centrales et plasmatiques (e.g., Meusen & De Meirleir, 1995 ; Meusen et al., 2001 ; Chmura *et al.*, 1994) et une augmentation de l'effort investi dans la tâche au cours de l'exercice (Arcelin *et al.*, 1998 ; Delignières & Brisswalter, 1994), les trois étapes de traitement pris en considération dans cette étude pourraient être affectées par la réalisation d'un exercice physique. Si l'exercice affecte l'étape d'extraction des caractéristiques physiques du stimulus, l'hypothèse la plus vraisemblable est celle d'une interaction entre la qualité du signal et l'exercice. Selon la même logique, si l'exercice affecte l'étape de sélection de la réponse, on peut s'attendre à observer une interaction entre la compatibilité stimulus-réponse et l'exercice. Enfin, si l'exercice affecte l'étape d'ajustement moteur nos résultats devraient être conformes à ceux d'Arcelin *et al.* (1998) et une interaction entre la durée de la période préparatoire et l'exercice devrait être mise en évidence.

METHODE

SELECTION DES SUJETS

L'objectif de cette sélection était de regrouper 16 sujets possédant des caractéristiques particulièrement propices à l'observation d'un effet de facilitation des performances cognitives au cours de la réalisation d'un exercice physique. Les sujets retenus pour cette première expérience ont été sélectionnés d'après 3 critères : leur expertise en prise de décision, leur quantité de pratique physique par semaine et leur degré de dépendance aux principales drogues sociales stimulantes (nicotine et caféine). Nous avons choisi de retenir uniquement des sportifs entraînés, spécialistes en sports collectifs, sports de combat ou en sports de raquettes s'entraînant régulièrement et plusieurs fois par semaine. Afin d'éviter toute

interférence liée à une addiction vis à vis de drogues sociales psycho-stimulantes, nous avons écarté les sujets ayant une consommation journalière importante de nicotine et/ou de caféine.

En ce qui concerne le degré de dépendance à la nicotine, la sélection des sujets a été effectuée par l'intermédiaire d'une version française (Etter, Vu Duc & Perneger, 1999) du Test de Dépendance à la Nicotine de Fagerström (Heatherton, Kozlowski, Frecker & Fagerstrom, 1991). Le critère d'exigence était l'obtention d'un score inférieur ou égal à 2/10, correspondant à une faible addiction voire une absence de dépendance à la nicotine.

Pour ce qui est du degré de dépendance à la caféine, nous avons choisi de retenir uniquement des sujets ayant une consommation modérée de caféine, c'est à dire ingérant une quantité de caféine inférieure à 300 mg par jour (Fernandes, Sabharwal, Smiley, Pastuszak, Koren & Einarson, 1998). Cette consommation a été évaluée en fonction du nombre de tasses de café et/ou de thé, ainsi que du nombre de verre de cola absorbé quotidiennement. La teneur en caféine était fixée à 74 mg de caféine pour une tasse de café et à 27 mg pour une tasse de thé (Gilbert, Marshman, Schwieder & Berg, 1976 cité par Fernandes, Sabharwal, Smiley, Pastuszak, Koren & Einarson, 1998). Le taux de caféine contenu dans un verre de cola (0,2 litres) était estimé à 24 mg.

SUJETS

La population d'étude était composée de 16 sujets (7 filles et 9 garçons) spécialistes en sports de prise de décisions (sport collectifs, sports de raquettes). Les sujets s'entraînaient en moyenne cinq fois par semaine (± 1) et ne présentaient pas de dépendance à la caféine, ni à la nicotine. Leur valeur moyenne de $\dot{V}O_2\text{max}$ était respectivement de 44 ml.min⁻¹.kg⁻¹ (± 5) pour les filles et de 51 ml.min⁻¹.kg⁻¹ (± 6) pour les garçons. Leur PMA moyenne était respectivement de 227 watts (± 27) pour les filles et de 322 watts (± 26) pour les garçons. Le premier seuil ventilatoire des sujets a été estimé à une puissance de 135 watts (± 21) pour les filles et de 188 watts (± 38) pour les garçons (Tableau récapitulatif, Annexe 1).

La détermination du premier seuil ventilatoire de chaque sujet a été effectuée à partir des paramètres ventilatoires enregistrés au cours d'un test préliminaire de détermination de $\dot{V}O_2\text{max}$. L'intensité mécanique correspondant à l'apparition du premier seuil ventilatoire a

été déterminée visuellement à partir de la cinétique d'évolution de $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ et $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ (cf. partie procédure pour des détails).

TACHE ET APPAREILLAGE

Le protocole expérimental auquel les sujets étaient confrontés consistait à réaliser une épreuve de double tâche, composée d'une tâche de TRC et d'un exercice de pédalage d'intensité sous-maximale constante.

Tâche de temps de réaction de choix

La tâche cognitive était une tâche de TRC à 4 éventualités consistant à actionner deux manettes par un mouvement de flexion ou d'extension avec la main droite ou la main gauche, en réponse à un stimulus visuel (Figure 20).

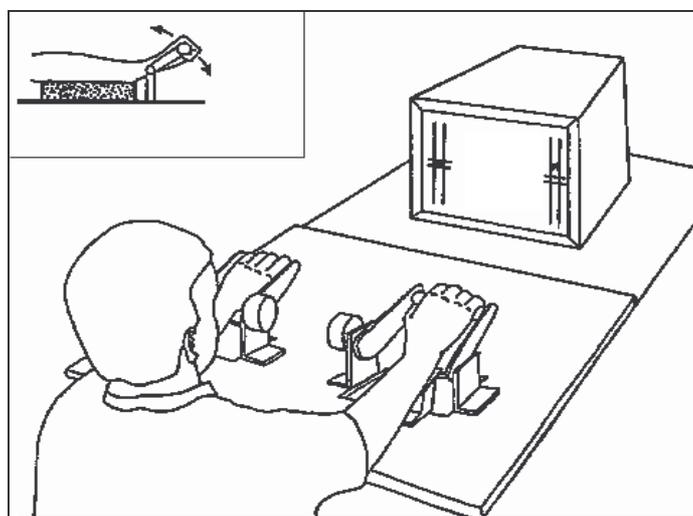


Figure 20. Dispositif de temps de réaction de choix.

Le signal impératif de réponse était composé de deux flèches présentées au centre d'un écran d'ordinateur. Quatre signaux différents pouvaient être présentés de manière aléatoire et chacun d'entre eux était associé à une réponse motrice spécifique. La latéralisation du geste et

la direction du mouvement à effectuer étaient déterminées par l'orientation de la pointe d'une flèche (Figure 21).

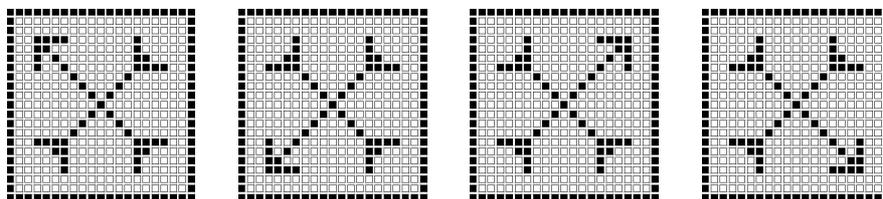


Figure 21. Signaux impératifs de réponse présentés aux sujets.

Chaque essai se déroulait à partir d'une plage de repositionnement, matérialisée par deux traits horizontaux distants de quatre centimètres, dans laquelle le sujet devait amener et stabiliser deux curseurs pendant 200 msec. La présentation d'un signal sonore d'intensité constante et d'une durée de 200 msec signalait le début d'une période préparatoire (PP). A l'issue de cette PP, le sujet devait répondre le plus rapidement dès l'apparition du signal impératif de réponse sans commettre d'erreur. Le déplacement vertical du curseur était enregistré grâce à des potentiomètres. La résistance des deux manettes était contrôlée par un frein électromagnétique de 8 Volts.

Le protocole expérimental impliquait la manipulation de trois facteurs cognitifs : la qualité du signal (QS) (image intacte versus dégradée), la compatibilité stimulus-réponse (CSR) (règle compatible versus incompatible) et l'incertitude temporelle (PP courte 500 msec versus longue 5000 msec). Au cours d'une même série (32 essais), tous les essais étaient réalisés selon les mêmes modalités de présentation et d'exécution.

Lorsque la série était composée d'images dégradées, chaque stimulus était dégradé de quatre manières différentes (Figure 22). D'un signal de réponse à un autre, les 4 mêmes techniques de brouillage étaient appliquées (Figure 23). L'ordre d'apparition des seize combinaisons possibles était alors déterminé de façon aléatoire afin de minimiser l'apprentissage perceptif des figures. Les signaux étaient dégradés en prélevant des carrés noirs de la bordure de l'image et en les plaçant, au hasard, à l'intérieur du cadre. Les signaux dégradés et non dégradés comportaient donc le même nombre de carrés noirs afin d'éviter toute différence de luminance d'une qualité d'image à l'autre.

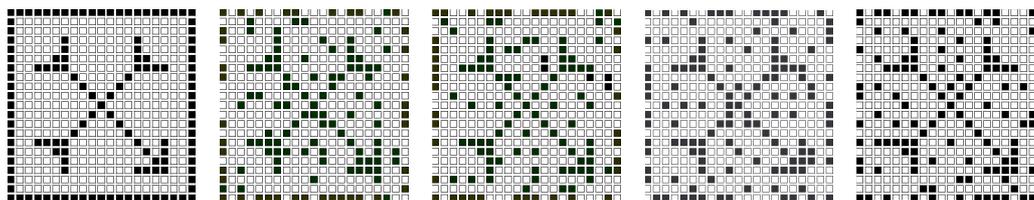


Figure 22. Exemple d'un signal impératif de réponse intact (à gauche) puis dégradé de 4 manières différentes.

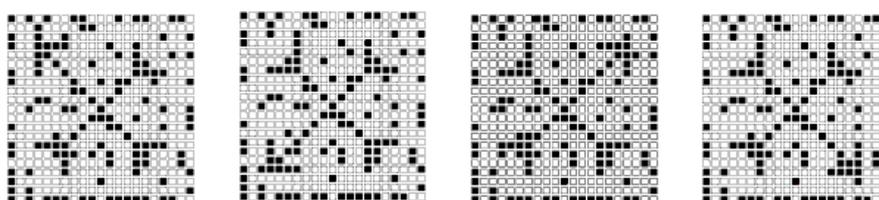


Figure 23. Exemple d'un type de dégradation appliquée aux différents signaux impératifs de réponse.

En fonction de la série, le sujet était invité à répondre en associant une règle plus ou moins naturelle au signal impératif de réponse présenté. Lorsque la règle était compatible, le sujet devait répondre par un mouvement orienté dans le sens indiqué par la flèche. Lorsque la règle était incompatible, la réponse devait être faite dans la direction inverse à celle indiquée par la flèche. Par exemple, une flèche orientée vers le haut à droite était associée à un mouvement du poignet droit vers le haut pour la règle compatible et associée à un mouvement du poignet gauche vers le bas dans le cas de la règle incompatible.

Enfin, l'incertitude temporelle était manipulée par l'intermédiaire de la durée de la PP (i.e. durée séparant le signal préparatoire du signal impératif de réponse). Le sujet était confronté soit à une situation de faible incertitude temporelle (PP courte de 500 msec), soit à une situation de forte incertitude temporelle (PP longue de 5000 msec).

La QS, la durée de la PP et la règle à appliquer tout au long de la série étaient spécifiés au sujet au début de chaque série.

Epreuve de double tâche

Au cours de l'épreuve de double tâche, le sujet devait répondre le plus rapidement possible, sans commettre d'erreur, dès l'apparition du signal de réponse au cours d'un exercice de pédalage sur ergocycle.

La sollicitation physiologique imposée au sujet était une épreuve de 40 minutes, composée de deux blocs d'exercice de 20 minutes réalisés à une intensité constante et sous-maximale. L'épreuve de double tâche commençait systématiquement par une tâche simple de pédalage de 3 minutes afin de stabiliser la cadence de pédalage et les paramètres physiologiques. La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage étaient enregistrées de manière continue à l'aide d'un Polar (Sport tester systems) pendant toute la durée de l'exercice. Aucune information concernant la fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage n'était donnée en cours d'exécution afin de ne pas surcharger le sujet en multipliant les informations disponibles. Avant le début de l'épreuve, le sujet avait simplement pour consigne d'essayer de maintenir constante sa fréquence de pédalage (librement choisie au cours des premières minutes).

Selon la session expérimentale, la charge de travail était nulle (repos), faible (20% de PMA) ou modérée (50% de PMA). Individuellement, les deux intensités mécaniques étaient déterminées par rapport aux valeurs enregistrées pour chaque sujet au cours d'un test préliminaire d'effort maximal. Les trois sessions expérimentales étaient réalisées au cours de journées distinctes et à heures fixes. L'ordre de passation des sessions expérimentales était contrebalancé entre les différents sujets.

Questionnaires d'état d'humeur et d'évaluation de sensations subjectives

Dans le but d'appréhender d'éventuels changements d'humeur au cours du protocole expérimental, les sujets remplissaient deux questionnaires d'auto-évaluation : le Profile Of Mood States (POMS-f ; Cayrou, Dickès, Gauvain-Piquard, Dolbeault, Callahan & Roge, 2000) et une adaptation française du Visual Analog Scale de Bond et Lader (1974) (cf. expérience préliminaire).

Le POMS-f est un questionnaire composé de 65 adjectifs (e.g., amical, tendu, en colère) évaluant sept états d'humeur: Anxiété/Tension, Colère/Hostilité, Confusion/Perplexité, Dépression/Découragement, Fatigue/Inertie, Vigueur/Activité et Relations interpersonnelles.

L'intensité des sensations et des émotions ressenties, au moment où le sujet remplit le questionnaire, est estimée par l'intermédiaire d'une échelle de cotation de type Likert cotée de 0 à 4. Les réponses proposées au sujet sont les suivantes : (0) "pas du tout", (1) "un peu", (2) "modérément", (3) "beaucoup", (4) "extrêmement". Le sujet avait pour consigne d'entourer le chiffre correspondant le mieux à ce qu'il ressentait au moment où il remplissait le questionnaire (Annexe 2).

L'échelle visuelle analogique est composée de 16 items (Annexe 3). D'après une analyse en composantes principales, ce questionnaire se résume selon trois facteurs principaux relatifs à la Vigilance/Dynamisme (8 items), la Tranquillité/Sérénité (3 items) et la Satisfaction/Sociabilité (5 items). Les sensations subjectives du sujet étaient évaluées par l'intermédiaire d'une échelle visuelle analogique de 100 millimètres, sur laquelle le sujet indiquait sa réponse en plaçant une marque perpendiculaire sur un continuum séparant deux adjectifs antagonistes.

Echelles d'évaluation de la difficulté perçue

Afin de contrôler l'effort investi dans la tâche, l'échelle DP-15 de perception de la difficulté (Delignières, Famose & Genty, 1994b) a également été utilisée. Cette échelle de cotation permet d'estimer à priori la difficulté perçue de la tâche (Annexe 4). Le sujet a pour consigne d'estimer le niveau de difficulté de la tâche demandée en entourant un score situé sur le continuum. L'échelle est cotée de 1 à 15 et sept adjectifs placés en face des nombres pairs servent de référence : (2) tâche extrêmement facile, (4) tâche très facile, (6) tâche facile, (8) tâche moyenne, (10) tâche un peu difficile, (12) tâche difficile, (14) tâche extrêmement difficile.

L'ordre de passation des questionnaires d'humeur et de sensations subjectives ainsi que l'échelle DP-15 était contrebalancé entre les différents sujets. Le contre-balancement a été mis en place de façon à ce que l'échelle de perception de la difficulté soit complétée immédiatement avant la réalisation de l'épreuve de double tâche.

Fréquence Critique de Fusion (FCF)

La fréquence critique de fusion est considérée comme un indice de l'activité du système nerveux central et un reflet indirect du niveau d'éveil cortical (Smith & Misiak, 1976 ; Parkin, Fairweather, Shamsi, Stanley, & Hindmarch, 1998). Il s'agit d'une technique basée sur la détermination du changement de fréquence d'un signal visuel, dont le résultat est exprimé en hertz. Au cours de ce test, la fréquence de clignotement des diodes lumineuses était située sur une plage allant de 0 à 100 hertz. Les avant bras posés sur une table, le sujet appliquait son visage contre un masque et regardait à l'intérieur d'un tube sombre. Dès la mise en marche du dispositif (modèle 12021*C, Campden Instruments), une diode lumineuse s'allumait en face de chaque œil (58 cd/m²). La fréquence de clignotement, identique pour chacune des deux diodes, évoluait d'un hertz par seconde en allant soit dans le sens d'une augmentation (fréquence ascendante ou Fusion), soit dans celui d'une diminution (fréquence descendante ou Flicker). Le but de la tâche était de déterminer, après une fixation fovéale de quelques secondes, le moment où la lumière passait d'un mode de fonctionnement alternatif à un mode continu (ou inversement). Le sujet était invité à réagir en appuyant sur un bouton dès qu'il percevait ce changement. Au cours de chaque série, le sujet effectuait six essais consécutifs en alternant à chaque fois un essai en phase ascendante et un essai en phase descendante.

PROCEDURE

Après avoir signé une feuille de consentement (Annexe 5), chaque sujet participait à un test d'effort maximal, à une session d'apprentissage et de familiarisation et à trois sessions expérimentales. Les 5 sessions étaient réalisées au cours de journées distinctes.

L'épreuve d'effort maximal, réalisée au Service d'Explorations Fonctionnelles Respiratoires du Centre Hospitalier Universitaire de Poitiers, et la détermination du seuil ventilatoire ont été effectuées selon les modalités définies dans la partie théorique de ce mémoire. L'objectif de ce test triangulaire était de mesurer le $\dot{V}O_2$ max et de déterminer la PMA de chaque sujet afin de calculer les charges de travail des sessions expérimentales suivantes. Le seuil ventilatoire a permis de caractériser *a posteriori* la nature de la sollicitation physiologique pour chaque sujet.

La session d'apprentissage et de familiarisation a été effectuée dans le but de sensibiliser le sujet avec les différentes tâches et de minimiser les effets d'apprentissage en stabilisant les courbes de performance. Cette session consistait, dans un premier temps, à réaliser autant de séries de TR de 40 essais qu'il était nécessaire pour satisfaire simultanément 2 critères d'apprentissage : une variabilité des TR inférieure à 17% du TR moyen et un taux d'erreurs inférieur à 5% (Sanders, 1980 ; Sanders, 1990). Au cours de cette phase d'apprentissage, la qualité des images était intacte et la durée de la PP était fixée à 1000 msec.

Dans un deuxième temps, le sujet effectuait une épreuve de familiarisation avec la tâche de TR en effectuant autant de séries de TR que de conditions expérimentales différentes modalités différentes (qualités du signal x 2, règles d'appariement stimulus-réponse x 2, durées de la PP x 2). Afin de se sensibiliser au mode de fonctionnement de l'appareil, le sujet effectuait également un test de FCF.

Au cours de chacune des trois sessions expérimentales, réalisées au cours de journées distinctes et à heures fixes, le sujet réalisait 256 essais de TR réussis le matin et l'après-midi. Les 256 essais étaient chaque fois répartis en 2 blocs de 128 essais et chaque bloc était composé de 4 séries de 32 essais de TR réalisées selon des modalités de présentation et d'exécution différentes (Figure 24). Lorsque le sujet fournissait une réponse incorrecte, la nature de l'erreur commise était enregistrée et l'essai non réussi était systématiquement représenté plus tard au cours de la série. La durée de passation d'un bloc de 128 essais réussis était d'environ 17 minutes et une période de récupération était accordée au sujet entre les deux blocs. L'ordre de passation des différents blocs et les modalités des différentes séries de TR était contrebalancé entre les sujets (Annexe 6).

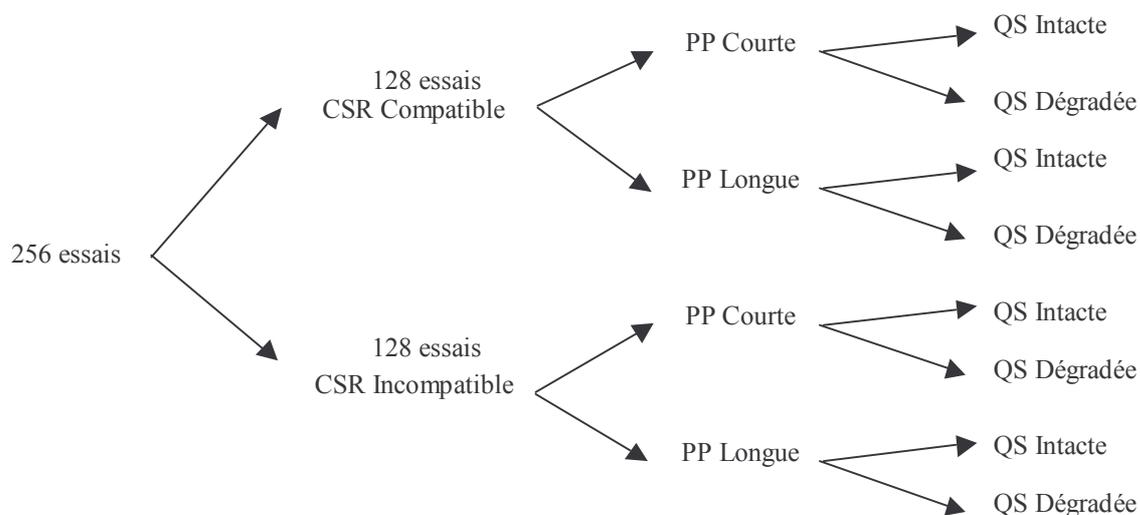


Figure 24. Répartition du nombre total d'essais de temps de réaction au sein des 2 blocs, en fonction de la manipulation des différents facteurs cognitifs.

Le matin de chaque session expérimentale, le sujet réalisait au repos (i.e. installé sur la bicyclette sans pédaler) 2 blocs de TR de 128 essais. Une période de récupération lui était accordée entre chaque bloc. Avant et après chaque bloc, il effectuait également un test de détermination de FCF. Les résultats obtenus, au cours de ces différents tests, faisaient respectivement office de valeurs de référence pour chaque session expérimentale.

En début d'après-midi, après avoir enregistré sa fréquence cardiaque au repos, le sujet commençait directement la tâche de TR dans la condition repos ou réalisait un échauffement de 3 minutes dans la condition 20% ou 50% de PMA. En effet, lorsque la sollicitation physiologique n'était pas nulle, la tâche de TR débutait à partir de la troisième minute d'exercice. Sans interrompre son effort physique, le sujet réalisait le premier bloc de TR (4 séries de 32 essais) entrecoupé de quelques secondes nécessaires à la programmation de chaque série. Après chaque essai, une connaissance du résultat était donnée au sujet. Elle concernait soit la rapidité d'exécution de la réponse, soit la nature de l'erreur commise : anticipation ($TR < 150$ msec), omission ($TR > 2000$ msec), erreur de décision (erreur de côté, erreur de direction ou erreur double). A la fin du premier bloc, une période de récupération était accordée au sujet. La durée de cette période, variable selon les individus (environ 5 minutes), était déterminée en fonction du temps nécessaire pour que la fréquence cardiaque du

sujet revienne à des valeurs proches de celles enregistrées avant la tâche. Le sujet effectuait ensuite le deuxième bloc de TR.

Avant et après chaque bloc, le sujet effectuait un test de FCF et remplissait les deux questionnaires de sensations subjectives. La difficulté perçue était également évaluée au début de chaque série (Figure 25).

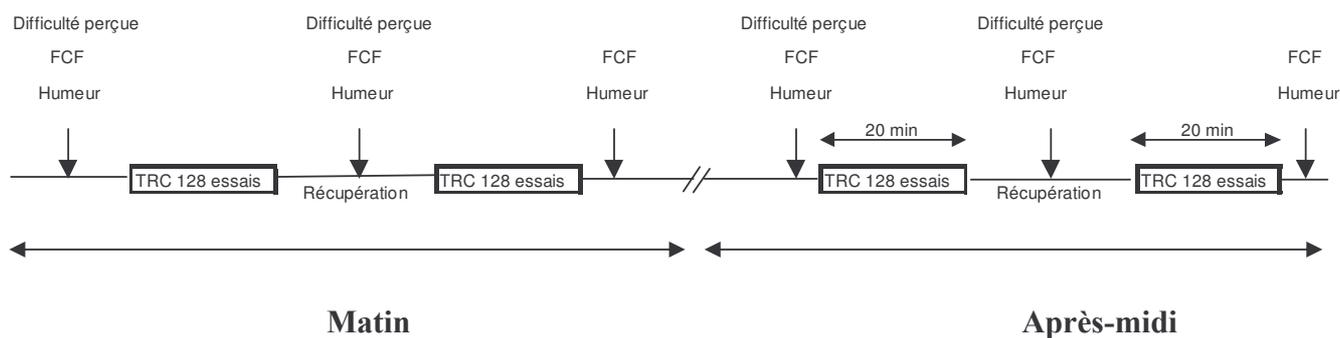


Figure 25. Déroulement temporel des sessions expérimentales.

Le déroulement temporel du protocole était identique pour les trois sessions expérimentales, seule l'intensité de la sollicitation physiologique de l'après-midi variait d'une session à l'autre (repos, 20% ou 50% de PMA).

TRAITEMENT DES DONNEES

Variables chronométriques

Lors du traitement des variables chronométriques, seuls les TR ayant donné lieu à la production d'une réponse correcte ont été pris en considération. Partant du principe que toute réponse erronée résulte d'un traitement anormal ou incomplet du stimulus, nous avons systématiquement exclu des analyses les erreurs d'anticipation, les erreurs d'omission et les erreurs de décision.

Taux d'erreurs de décision

Le taux d'erreur de décision enregistré au cours de chaque session a été calculé en fonction du nombre total d'essais réalisés par le sujet dans cette condition expérimentale : $\text{Nombre d'erreur de décision} / (\text{nombre d'essais réussis} + \text{nombre d'essais incorrects}) \times 100$.

La moyenne et la variance des données exprimées en pourcentage étant fortement dépendantes, l'utilisation d'une analyse inférencielle est fortement déconseillée dans ce cas de figure. Cependant, une transformation arcsinus de ces données permet de stabiliser les variances (Winer, 1970). L'ensemble des données exprimées en pourcentage a donc été transformé avant d'être soumis à une analyse de variance.

Fréquence Critique de Fusion

Pour chaque test de détermination de FCF, le sujet effectuait six essais consécutifs en alternant à chaque fois un essai en phase ascendante et un essai en phase descendante. Les données expérimentales ont fait l'objet de deux traitements différents.

Un premier traitement a été effectué afin d'appréhender les effets de l'intensité de l'exercice sur le niveau d'éveil cortical des sujets. Les valeurs des six essais consécutifs (réalisés en phase ascendante et descendante) ont été moyennées et soumises à une analyse statistique afin d'observer d'éventuels changements en fonction de différentes conditions expérimentales.

Le test de détermination de FCF étant une tâche de discrimination visuelle, le sujet est confronté à une difficulté de jugement sensoriel. D'après la théorie de la détection du signal, les résultats obtenus au cours de ce type de test peuvent être biaisés par l'attitude que le sujet choisi d'adopter (observateur prudent versus observateur laxiste). Un deuxième traitement a donc été effectué afin d'évaluer la présence d'éventuels changements de stratégie vis à vis de la discrimination du signal entre les tests de détermination effectués avant et après la tâche. Pour cela, l'écart entre les essais obtenus en phase ascendante et descendante a été calculé et une analyse statistique a été effectuée sur ces valeurs en fonction des différentes conditions expérimentales. Si le sujet conserve la même stratégie de discrimination, aucune différence ne devrait être observée en fonction des différentes conditions expérimentales. A l'inverse, si le jugement sensoriel du sujet diffère d'une condition à une autre, on devrait observer une modification de l'écart entre les valeurs ascendantes et descendantes dans le sens d'une

augmentation (observateur plus laxiste) ou d'une diminution (observateur plus prudent).

Questionnaires d'état d'humeur et d'évaluation de sensations subjectives

En ce qui concerne l'échelle visuelle analogique, les scores relatifs aux différents items ont été analysés sur la base des résultats de l'analyse en composante principale effectuée dans le cadre de la validation française du questionnaire de Bond et Lader (1974). Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes uniquement intéressés au premier facteur Vigilance/Dynamisme. Les scores obtenus aux différents items constituant ce facteur ont été multipliés par leur poids factoriel respectif (cf. expérience préliminaire pour des détails). Les données pondérées des différents items ont ensuite été additionnées afin de fournir une valeur algébrique représentative du facteur Vigilance/Dynamisme.

Les résultats obtenus au cours de la passation du POMS-f ont été analysés en fonction des 7 sous-échelles (Cayrou *et al.*, 2000). Le score de chaque sous-échelle a été calculé en additionnant les scores des différents items (Annexe 2). Deux items ont une cotation inversée : "détendu" pour l'échelle "anxiété-tension" et "efficace" pour l'échelle "confusion-perplexité". L'échelle était considérée comme valide lorsque moins de deux items dans une sous-échelle ou lorsque moins de 10% des items du questionnaire n'étaient pas remplis. Dans le cadre de cette étude, nous ne nous sommes uniquement intéressés qu'au facteur Vigueur/Activité.

Fréquence cardiaque et fréquence de pédalage

Enfin, le traitement des données relatives à la fréquence cardiaque et à la fréquence de pédalage, enregistrées de manière continue au cours de la tâche simultanée, a été effectué sur 3 périodes de temps correspondant respectivement au début, au milieu et à la fin de la sollicitation physiologique. Parmi l'ensemble des données, enregistrées au cours des 2 blocs d'exercice de 20 minutes, trois périodes de temps ont été prises en considération pour chacun des 2 blocs : la première période correspondait aux valeurs enregistrées entre la 6^{ème} à la 9^{ème} minute, la deuxième période aux valeurs enregistrées entre la 11^{ème} à la 14^{ème} minute et la troisième période aux valeurs enregistrées entre la 16^{ème} à la 19^{ème} minute.

RESULTATS

STATISTIQUES

L'effet de l'exercice sur la fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage, ainsi que l'effet des différents facteurs cognitifs manipulés sur les variables chronométriques étaient soumis à une série d'analyses de variance (ANOVA). L'utilisation traditionnelle de l'ANOVA étant associée à un risque important de violation du postulat de sphéricité, deux types de tests statistiques sont généralement utilisés lorsque l'on rencontre un risque de violation du postulat de sphéricité. La première possibilité est d'utiliser une ANOVA associée à un test de correction des degrés de liberté du F classique tels que Greenhouse-Geisser ou Huynh-Feldt. La deuxième possibilité est d'éliminer tout risque de violation du postulat de sphéricité en utilisant une MANOVA. Dans le cadre de cette étude, un test de correction des degrés de liberté (ajustements de Greenhouse-Geisser) a été systématiquement réalisé lorsqu'un facteur à mesures répétées comportait plus de deux modalités. Lors de l'obtention d'une interaction significative, une comparaison de moyennes a été effectuée par l'intermédiaire d'une analyse a posteriori de Newman-Keuls. Le seuil de signification pour l'ensemble des résultats a été fixé à une valeur alpha égale à .05.

Le TR moyen, la variance des TR, le taux d'erreurs de décision, la FCF et les résultats des questionnaires subjectifs étaient, quant à eux, analysés par l'intermédiaire d'analyses de covariance (ANCOVA). L'analyse de covariance a été utilisée afin d'écartier la variabilité des performances qui n'était pas liée à l'effet du facteur expérimental manipulé (intensité de la sollicitation physiologique). En effet, le protocole de cette étude a été conçu de façon à disposer d'une mesure de la covariée au cours de chaque session expérimentale. Le plan expérimental de l'analyse de variance a donc été spécifié de façon à utiliser les performances de références réalisées le matin, au repos et au cours de chaque session comme covariables changeantes. On notera que l'analyse de covariance n'est pas le seul moyen de traiter des données impliquant une covariée importante, il existe également les scores de différence. Dans le cadre de cette étude, les deux traitements statistiques ont été réalisés. Les analyses ayant donné les mêmes résultats (cf. Davranche & Audiffren, 2002b), par souci de compréhension, nous avons choisi de présenter uniquement les résultats de l'ANCOVA. En

effet, l'analyse de covariance ne nécessitant pas de transformation par soustraction, les résultats sont plus compréhensibles car l'interprétation se fait sur des valeurs de TR moyen et non sur des différences de TR (cf. Davranche & Audiffren, 2002a ; 2002b).

La partie *Résultats* de cette première expérience est organisée en fonction de la logique suivante : afin de contrôler le bien fondé du protocole expérimental, nous commencerons par présenter les résultats relatifs à la fréquence cardiaque, la fréquence de pédalage, la difficulté perçue (échelle DP-15) et aux facteurs cognitifs manipulés (QS, CSR et incertitude temporelle). Une fois les pré-requis du protocole expérimental vérifiés, nous évaluerons l'effet de l'exercice sur l'état énergétique des sujets à partir des valeurs de FCF et des deux questionnaires de sensations subjectives (Échelle visuelle analogique et POMS-f). Enfin, sur la base de la logique de la MFA de Sternberg (1969), nous finirons par présenter les résultats relatifs à la localisation de l'effet de facilitation au niveau des différents stades de traitement de l'information.

FREQUENCE CARDIAQUE, FREQUENCE DE PEDALAGE ET DIFFICULTE PERÇUE

La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage ont été analysées au cours de trois périodes de temps : entre la 6^{ème} et la 9^{ème} minute, entre la 11^{ème} et la 14^{ème} minute et entre la 16^{ème} et la 19^{ème} minute. Le plan d'expérience de l'ANOVA était composé de 3 facteurs à mesures répétées : un facteur à trois modalités (période) et deux facteurs à deux modalités (intensité de l'exercice, bloc).

Au niveau de la fréquence cardiaque (FC), suite à des problèmes d'acquisition, les données de 5 sujets n'ont pu être exploitées. L'analyse statistique a donc été réalisée sur un nombre réduit de sujets ($n = 11$). Les résultats mettent en évidence une augmentation de la FC avec l'intensité de l'exercice ($F(1, 10) = 268, p < .05$), une augmentation de la FC au cours des 20 minutes d'exercice ($F(2, 20) = 34.49, p < .05$), une interaction entre le facteur intensité et le facteur bloc ($F(1, 10) = 6.92, p < .05$), ainsi qu'entre le facteur période et le facteur bloc ($F(2, 20) = 4.80, p < .05$). A 50 % de PMA, on observe une augmentation constante de la FC. La fréquence de cardiaque passe de 141 bat.min⁻¹ à 145 bat.min⁻¹ entre la première et la deuxième période de temps, pour atteindre 147 bat.min⁻¹ à la fin de l'exercice. En revanche, à 20 % de PMA, la FC reste stable entre la première et la deuxième période de temps (6^{ème} à la

9^{ème} minute : $\underline{M} = 98 \text{ bat.min}^{-1}$; 11^{ème} à la 14^{ème} minute : $\underline{M} = 100 \text{ bat.min}^{-1}$) et augmente significativement en fin d'exercice (16^{ème} à la 19^{ème} minute : $\underline{M} = 101 \text{ bat.min}^{-1}$) (Figure 26).

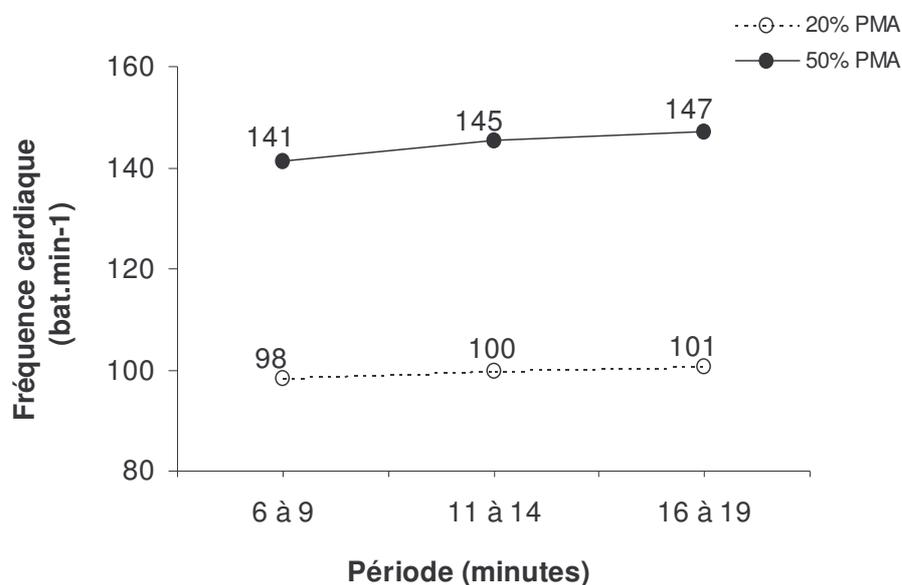


Figure 26. Evolution de la fréquence cardiaque (bat.min⁻¹) au cours d'un bloc de 20 minutes d'exercice physique en fonction de l'intensité de l'exercice (20 % de PMA -o- versus 50 % de PMA -●-).

A la suite à des problèmes d'acquisition de données, l'analyse statistique des valeurs de fréquence de pédalage (FP) a été réalisée sur les données de 13 sujets. Une interaction significative a été observée entre l'intensité de l'exercice et la période ($F(2, 24) = 5.69$, $p < .05$), ainsi qu'entre le bloc et la période ($F(2, 24) = 4.43$, $p < .05$). A 50 % de PMA, on remarque une augmentation constante de la FP au cours des 20 minutes d'exercice. La fréquence de pédalage passe de 70 tr.min⁻¹ entre la 6^{ème} et la 9^{ème} minute, à 71 tr.min⁻¹ entre la 11^{ème} et la 14^{ème} minute, pour atteindre 73 tr.min⁻¹ entre la 16^{ème} et la 19^{ème} minute. A 20 % de PMA, la FP augmente entre la première et la deuxième période de temps (6^{ème} à la 9^{ème} minute : 60 tr.min⁻¹ ; 11^{ème} à la 14^{ème} minute : $\underline{M} = 61 \text{ tr.min}^{-1}$), puis elle se stabilise à partir de la 14^{ème} minute d'exercice (Figure 27). Les changements de fréquence gestuelle entre les différentes périodes sont uniquement significatifs au cours du premier bloc d'exercice.

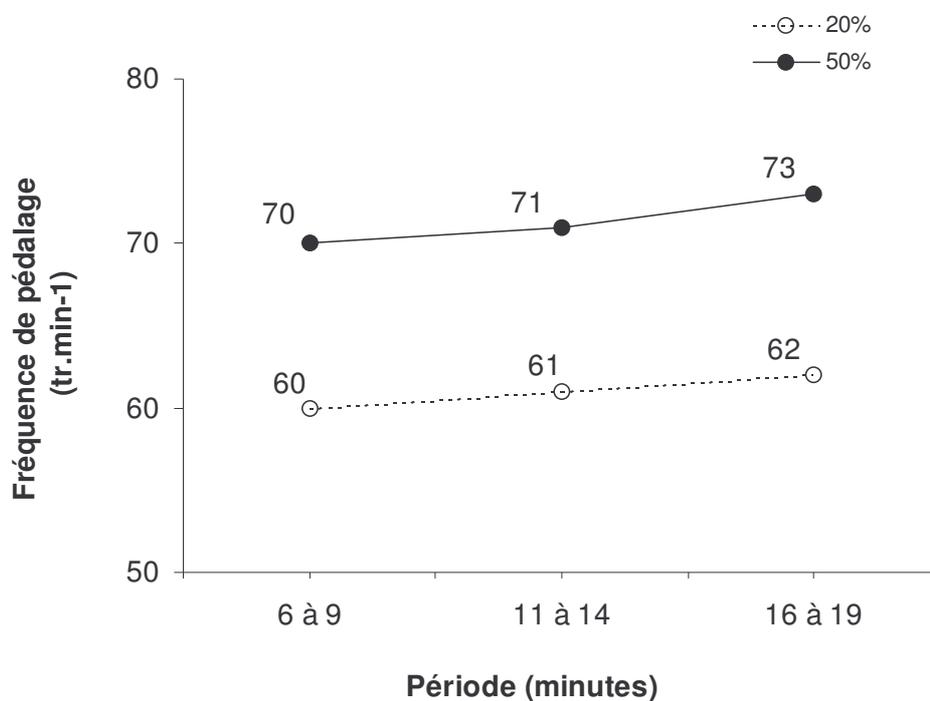


Figure 27. Evolution de la fréquence de pédalage (tr.min⁻¹) au cours d'un bloc de 20 minutes d'exercice en fonction de l'intensité d'exercice (20 % de PMA -○- versus 50 % de PMA -●-).

L'effet de l'exercice sur la difficulté perçue a été analysé par l'intermédiaire d'une ANCOVA. Le plan d'expérience était composé d'un facteur à trois modalités (intensité de l'exercice : repos, 20% PMA et 50% PMA) et d'un facteur à deux modalités (série : score après le premier bloc et après le deuxième bloc). Les scores de référence obtenus le matin de chaque session expérimentale ont été utilisés comme covariable changeante. Les résultats de l'analyse montrent que la difficulté perçue augmente avec l'intensité de la sollicitation ($F(2, 28) = 13.02, p < .05$). La difficulté perçue est plus importante à 50% de PMA ($\underline{M} = 10$) qu'à 20% de PMA ($\underline{M} = 9$) et plus importante à 20% de PMA qu'au repos ($\underline{M} = 7$).

QUALITE DU SIGNAL, COMPATIBILITE STIMULUS-REPPONSE ET INCERTITUDE TEMPORELLE

L'effet des différents facteurs cognitifs a été analysé par l'intermédiaire de trois analyses inférencielles : une première analyse a été effectuée sur les valeurs de TR, une seconde analyse sur la variance du TR et une dernière sur la transformation arcsinus du taux d'erreurs de décision. Le plan d'expérience était composé d'un facteur à trois modalités :

intensité de l'exercice (repos, 20% PMA et 50% PMA) et de quatre facteurs à deux modalités : le moment de la journée (matin versus après-midi), la qualité du signal (QS ; intacte versus dégradée), la compatibilité stimulus-réponse (CSR ; règle compatible versus incompatible) et l'incertitude temporelle (PP ; durée de la période préparatoire courte versus longue).

Conformément aux données de la littérature, nous avons observé une augmentation significative du TR moyen suite à la dégradation de la qualité du signal ($F(1, 14) = 160.82, p < .05$; $M = 537$ msec versus $M = 615$ msec), à la manipulation de la compatibilité stimulus-réponse ($F(1, 14) = 190.20, p < .05$; $M = 518$ msec versus $M = 634$ msec) et à l'allongement de la durée de la période préparatoire ($F(1, 14) = 6.32, p < .05$; $M = 567$ msec versus $M = 585$ msec) (Figure 28). De plus, nous avons également observé une augmentation de la variance avec la dégradation de la qualité du signal ($F(1, 14) = 84.46, p < .05$; $M = 19069$ msec² versus $M = 10042$ msec²), et avec la manipulation de la compatibilité stimulus-réponse ($F(1, 14) = 32.37, p < .05$; $M = 18568$ msec² versus $M = 10544$ msec²). Aucune modification significative de la variance n'a été observée suite à l'allongement de la durée de la période préparatoire ($F(1, 14) = 2.89, p = .11$) (Figure 29). Conformément aux résultats de la littérature, une additivité entre les effets des trois facteurs expérimentaux a été observée tant au niveau du TR moyen (QS x CSR : $F(1, 14) = 0, p = .99$; QS x PP : $F(1, 14) = 0, p = .94$; CSR x PP : $F(1, 14) = 0.02, p = .89$; QS x CSR x PP : $F(1, 14) = 0, p = .96$), qu'au niveau de la variance du TR (QS x CSR : $F(1, 14) = 1.88, p = .19$; QS x PP : $F(1, 14) = 0.37, p = .55$; CSR x PP : $F(1, 14) = 0.17, p = .68$; QS x CSR x PP : $F(1, 14) = 0.9, p = .35$).

En ce qui concerne l'effet des différents facteurs cognitifs sur le taux d'erreurs de décision, nous avons observé un effet principal de la CSR ($F(1, 14) = 8.22, p < .05$). Le taux d'erreur est plus important lorsque de la règle S-R est incompatible ($M = 4\%$) comparativement à une règle S-R compatible ($M = 3\%$). En contrepartie, aucune augmentation du taux d'erreur n'a été observée suite à la dégradation du stimulus ($F(1, 14) = 0.70, p = .42$) ou à l'allongement de la PP ($F(1, 14) = 0.15, p = .70$). Aucune interaction ne s'est révélée significative.

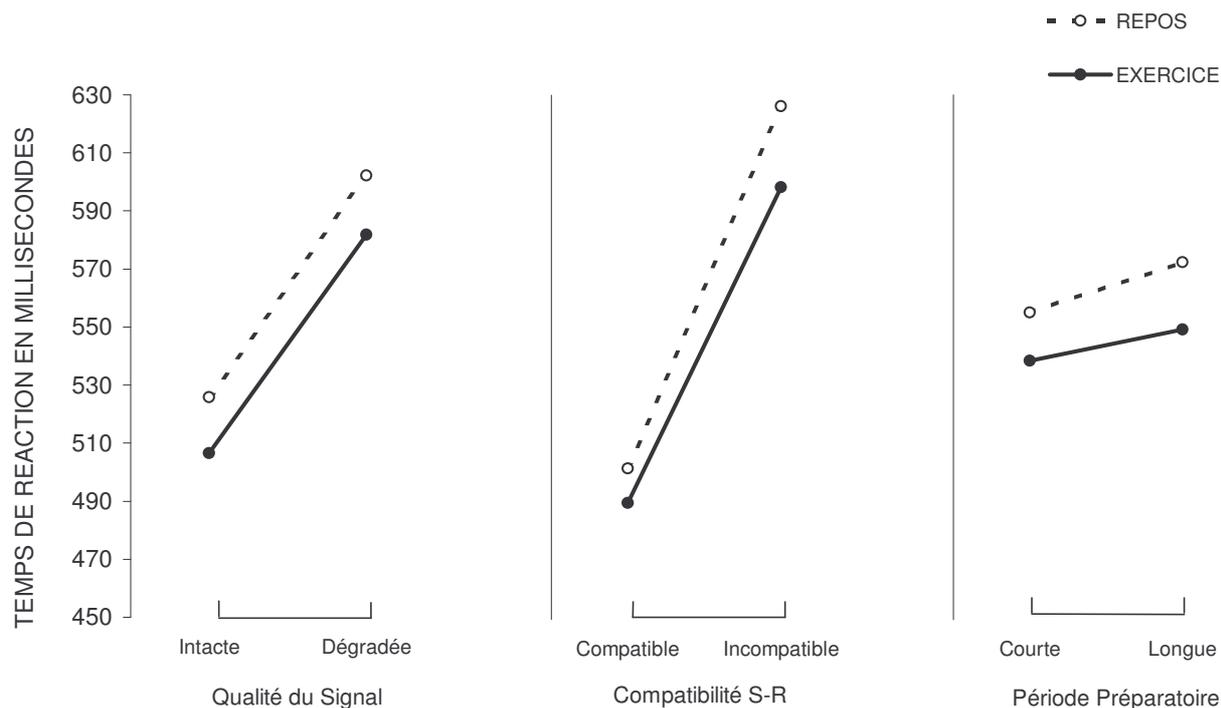


Figure 28. Temps de réaction (msec) au repos (-○-) et à 50% de PMA (-●-) en fonction des différentes modalités des facteurs cognitifs manipulés (de gauche à droite : Qualité du signal, Compatibilité S-R, Période préparatoire).

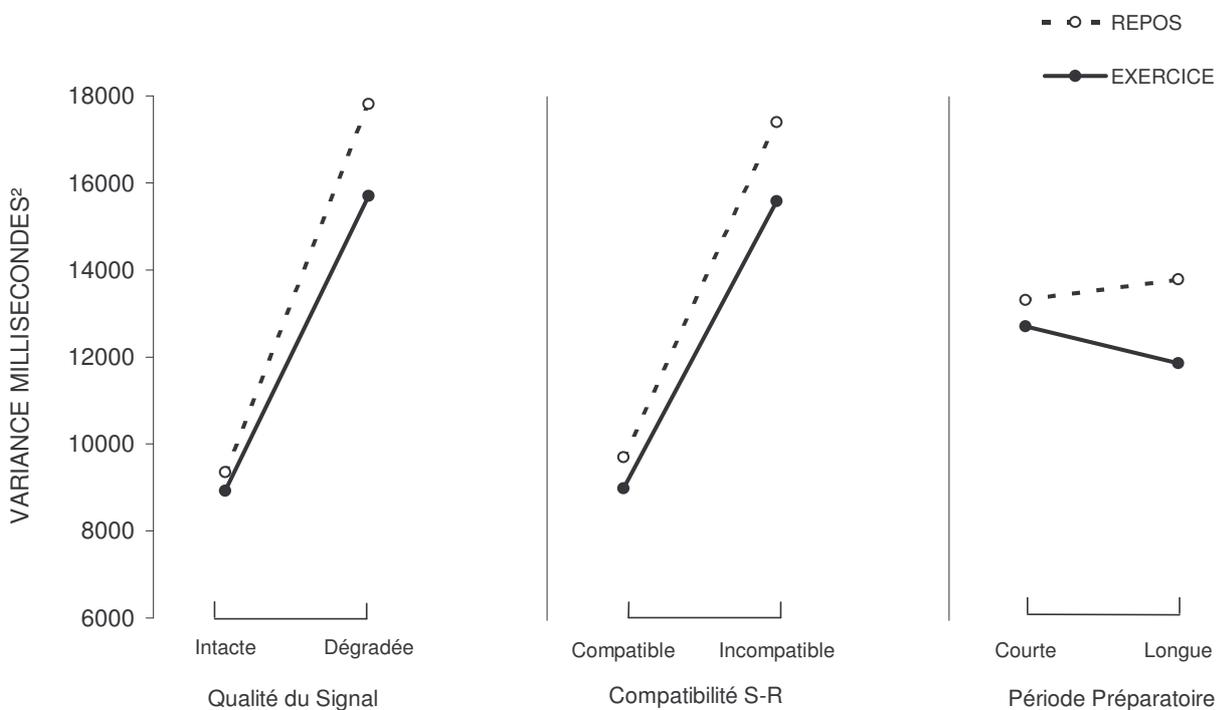


Figure 29. Variance du temps de réaction (msec²) au repos (-○-) et à 50% de PMA (-●-) en fonction des différentes modalités des facteurs cognitifs manipulés (de gauche à droite : Qualité du signal, Compatibilité S-R, Période préparatoire).

FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION ET QUESTIONNAIRES DE SENSATIONS SUBJECTIVES

Afin d'appréhender les effets de l'exercice physique sur l'état énergétique des sujets, les résultats obtenus au test de FCF et aux deux questionnaires de sensations subjectives ont été analysés par l'intermédiaire d'une ANCOVA. Les scores de référence obtenus le matin de chaque session expérimentale ont été utilisés comme covariable changeante. Le plan d'expérience était composé de deux facteurs à mesures répétées : un facteur à trois modalités (intensité de l'exercice) et un facteur à trois modalités (série : score avant la réalisation de la tâche, score après le premier bloc et score après le deuxième bloc). Pour chaque session expérimentale, une comparaison planifiée (C; Vecteur 2, -1, -1) a été effectuée afin de comparer les scores obtenus avant et après la réalisation de la tâche.

Les valeurs moyennes de FCF sont significativement différentes au cours des trois sessions expérimentales ($F(2, 28) = 4.02, p < .05$) et une interaction significative apparaît entre l'intensité de l'exercice et les séries ($F(4, 56) = 4.29, p < .05$). Au cours de la session repos, la comparaison des valeurs enregistrées avant ($M = 34.21$ hertz) et après la tâche simultanée ($M = 33.56$ hertz) met en évidence une diminution de la FCF ($F(1, 14) = 5.89, p < .05$). Paradoxalement, l'effet inverse est observé au cours de la session 50% PMA, où les valeurs de FCF enregistrées après la tâche simultanée ($M = 34.6$ hertz) sont plus élevées que celles enregistrées avant ($M = 34.11$ hertz) ($F(1, 14) = 10.74, p < .05$). En ce qui concerne la session 20% PMA, aucune différence n'a été observée au niveau de valeurs de FCF enregistrées avant et après la tâche simultanée (Figure 30).

Aucun effet significatif n'a été observé au niveau de l'écart entre les valeurs ascendantes et descendantes de FCF que ce soit au niveau de l'intensité d'exercice ($F(2, 28) = 1.04, p = .37$) ou au niveau du facteur série ($F(2, 28) = 0.47, p = .63$).

Les résultats des questionnaires subjectifs confirment les résultats observés au niveau de la FCF. Au niveau de l'échelle visuelle analogique, l'évolution du score de vigilance diffère en fonction de l'intensité de l'exercice ($F(4, 56) = 5.75, p < .05$). Les comparaisons planifiées effectuées sur les valeurs enregistrées avant et après la tâche vont également dans le sens d'une augmentation du niveau de vigilance des sujets avec l'exercice physique (Figure 31). En effet, au cours de la session 50% PMA, on observe une augmentation de l'état de vigilance des sujets après l'exercice ($F(1, 14) = 5.20, p < .05$). Graphiquement les résultats

suggèrent également une augmentation de l'état de vigilance au cours de la session 20% PMA et paradoxalement une diminution de la vigilance au cours de la session repos.

Au niveau des résultats du POMS-f, le score du facteur Vigueur/Activité a tendance à diminuer au cours de la session repos ($F(1, 14) = 3.44$, $p = .08$), alors qu'il reste stable au cours des sessions où la tâche de TR est réalisée pendant l'exercice.

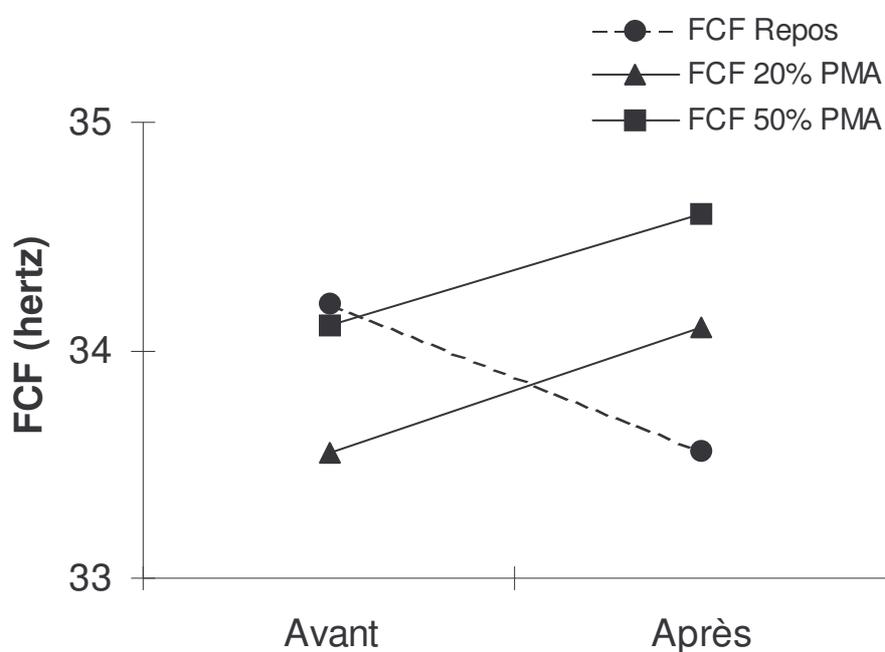


Figure 30. Evolution de la fréquence critique de fusion (FCF en hertz) avec l'exercice (avant exercice versus après exercice) en fonction de l'intensité de la sollicitation (repos -●-, 20% PMA -▲- et 50% PMA -■-).

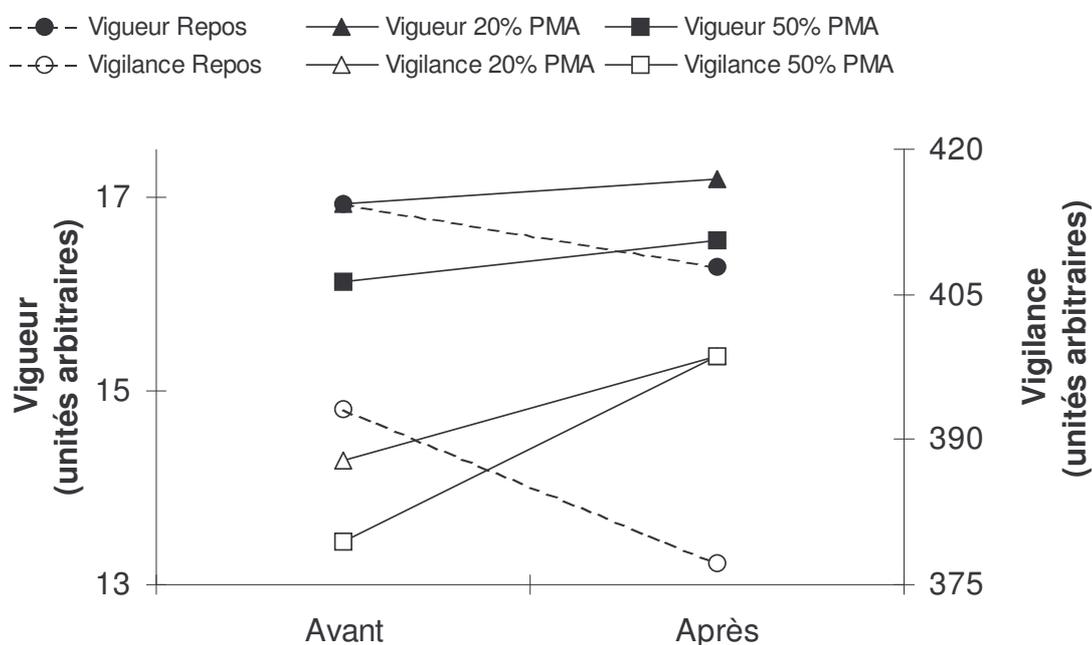


Figure 31. Evolution de l'état de vigilance (16-100mm, unités arbitraires, figure pleine) et de l'état de vigueur (POMS-f, unités arbitraires, figure vide) avec l'exercice en fonction de l'intensité de la sollicitation (repos, 20% PMA et 50% PMA).

ECHANGE VITESSE-PRECISION

L'effet de l'intensité de l'exercice (repos, 20% PMA et 50% PMA) sur le taux d'erreurs de décision a été testé par l'intermédiaire d'une ANCOVA. Le plan d'expérience était composé de quatre facteurs à mesures répétées : un facteur à trois modalités (l'intensité de l'exercice) et trois facteurs à deux modalités (la QS, la CSR et l'incertitude temporelle). Aucun effet de l'intensité de l'exercice n'a été observé sur le taux d'erreur de décision ($F(2, 28) = 0.59, p = .56$). Ce résultat suggère qu'aucun changement de stratégie vis-à-vis de l'échange vitesse-précision n'a été effectué par les sujets entre les différentes sessions (Pachella, 1974). Les changements observés au niveau du TR peuvent donc être considérés comme étant directement liés à la manipulation de l'intensité de l'exercice.

EFFET DE L'EXERCICE

L'effet de l'exercice physique sur les performances de TR a été analysé par l'intermédiaire d'une ANCOVA : une première analyse a été effectuée sur les valeurs de TR et une seconde analyse sur la variance du TR. Le plan d'expérience était composé de quatre facteurs à mesures répétées : un facteur à trois modalités (l'intensité de l'exercice) et trois facteurs à deux modalités (la QS, la CSR et l'incertitude temporelle).

Un effet principal de l'intensité de l'exercice a été observé au niveau des valeurs de TR moyen ($F(2, 28) = 3.87, p < .05$). Comparativement aux performances cognitives enregistrées au repos ($M = 564$ msec), les TR sont plus rapides lors de l'épreuve de tâche simultanée réalisée à 50% de PMA ($M = 544$ msec). Aucune différence significative n'a été observée entre les performances obtenues au repos et les performances obtenues lors de l'épreuve réalisée à 20% de PMA ($M = 555$ msec). Aucune interaction entre l'intensité de l'exercice et les facteurs cognitifs manipulés ne s'est avérée significative (Exercice x QS : $F(1, 14) = 0.01, p = .94$; Exercice x CSR : $F(1, 14) = 2.32, p = .15$; Exercice x PP : $F(1, 14) = 0.01, p = .94$).

Aucun effet de l'intensité de l'exercice n'a été observé au niveau de la variance du TR ($F(2, 28) = 0.55, p = .58$).

DISCUSSION

Suivant les recommandations méthodologiques de Tomporowski et Ellis (1986) et de Brisswalter et Legros (1996), ce protocole expérimental a été mis en place afin de préciser l'effet de facilitation des performances cognitives induit par la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale constante par l'intermédiaire de la MFA de Sternberg (1969). Au cours de ce protocole expérimental, trois intensités d'exercice différentes ont été manipulées : repos, 20% et 50% de PMA. L'expérience impliquait également la manipulation de trois facteurs cognitifs connus pour affecter des étapes de traitement distinctes : la qualité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et l'incertitude temporelle.

PRE-REQUIS DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Tout d'abord, les résultats comportementaux sont conformes aux attentes des auteurs, comparativement au repos les performances de TR sont meilleures au cours d'un exercice réalisé à 50% de PMA. De plus, conformément à la littérature, chacun des facteurs cognitifs manipulés affecte la performance de TR et les effets des trois facteurs sont additifs. Les résultats de cette étude apportent à la fois des arguments en faveur de l'utilisation d'un protocole uniformisé et répliquent ceux de nombreuses études ayant observées un effet de facilitation des performances cognitives lors de la réalisation d'un exercice physique d'intensité modérée.

EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE

Au cours du protocole expérimental, les valeurs de fréquence cardiaque témoignent d'une augmentation de la demande énergétique entre 20% et 50% de PMA. Les valeurs de fréquences cardiaques sont proportionnelles à l'intensité de la sollicitation. Etant donné le nombre de facteurs expérimentaux manipulés, chaque sujet réalisait 2 blocs de 128 essais de TR consécutifs à une intensité d'exercice donnée afin de bénéficier d'un nombre suffisant d'observations comportementales pour l'interprétation des résultats. Le fait qu'aucune différence n'apparaisse au niveau de la fréquence cardiaque d'un bloc d'essais à l'autre suggère que, pour une même intensité, les modifications physiologiques induites par l'exercice sont comparables. Toutefois, on observe une augmentation légère et progressive de la fréquence cardiaque au cours des 20 minutes d'exercice. Etant donné qu'à 20% comme à 50% de PMA, le mécanisme principalement sollicité reste le mécanisme aérobie et qu'une période conventionnelle de stabilisation des paramètres ventilatoires de 2 minutes a été respectée, il semblerait que cette augmentation de la fréquence cardiaque soit essentiellement due à la mise en place de mécanismes de thermorégulation probablement associée à une libération concomitante de noradrénaline (Rowell, Brengelman, Freund, 1987 cité par Arcelin, 1999). Cependant, le fait que le seuil ventilatoire n'ai pas été pris en considération lors de la sélection des sujets nous amène à tempérer cette interprétation. En effet, il s'avère que six sujets sur seize ont un premier seuil ventilatoire situé à une intensité inférieure à 50% de PMA (cf. Tableau 1, Annexe 1). L'hypothèse selon laquelle, à 50% de PMA, la dérive de la fréquence cardiaque observée dans le cadre de cette étude serait due à des phénomènes de fatigue et d'accumulation de déchets reste peu probable. Toutefois, cette constatation *a*

posteriori, nous incite à prendre en considération le premier seuil ventilatoire des sujets lors de la mise en place des protocoles suivants.

Tout comme les résultats exposés dans la partie précédente, la fréquence de pédalage varie d'une part en fonction de l'intensité de la sollicitation et d'autre part en fonction de la durée de l'exercice. L'accroissement de la cadence de pédalage avec l'augmentation de la puissance de travail est un résultat conforme à ceux de la littérature (i.e., Coast & Welch, 1985). L'évolution de la cadence gestuelle avec la durée de l'exercice suggère, quant à elle, que l'utilisation d'une fréquence de pédalage librement choisie permet au sujet de s'adapter aux contraintes et au temps passé sur la tâche. Le changement de type de fibres musculaires recrutées en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice expliqueraient en partie ces changements de fréquence. Conformément à des résultats antérieurs (Brisswalter, Hauswirth, Smith, Vercruyssen & Vallier, 2000), on remarque en effet que le sujet adapte sa fréquence gestuelle en fonction de la demande énergétique et qu'il choisit spontanément une cadence énergétique optimale.

EFFETS DE FACILITATION DES PERFORMANCES COGNITIVES

Conformément aux résultats de la littérature (e.g., Arcelin *et al.*, 1997, 1998; Brisswalter *et al.*, 1994; McMorris & Graydon, 1996a, 1997), les résultats de cette étude confirment que la réalisation d'un exercice sous-maximal engendre une amélioration des performances cognitives. Comparativement aux autres intensités d'exercice (repos et 20% de PMA), les sujets sont plus rapides à 50% de PMA (respectivement 20 msec et 11 msec) et cette amélioration des performances de TR ne se fait pas au détriment de la précision de la réponse. Le contre-balancement des sessions expérimentales entre les différents sujets, d'une part, et l'absence d'effet de l'exercice sur la variabilité de la performance, d'autre part, écarte l'hypothèse d'un éventuel effet d'apprentissage.

Compte tenu des résultats antérieurs suggérant l'apparition de phénomènes de facilitation à partir d'une intensité égale à 40% de PMA (Brisswalter *et al.*, 1994), la comparaison entre les performances obtenues au repos et à 20% de PMA devrait rendre compte de l'effet négatif de la double tâche. Contrairement aux prédictions de départ, aucune dégradation de la performance cognitive n'a été observée lors de la réalisation de la tâche simultanée. Ces résultats suggèrent clairement que l'absence de contrainte, vis à vis du maintien d'une fréquence de pédalage imposée, permet aux sujets d'optimiser leur

performance en s'adaptant librement aux contraintes de la tâche (Arcelin *et al.*, 1997; Brisswalter *et al.*, 1995). Dans cette étude, la tâche de pédalage réalisée à une cadence librement choisie n'a aucune conséquence négative sur les performances cognitives des sujets. *A contrario* les performances de TR tendent vers une amélioration malgré l'ajout de la tâche de pédalage. *A posteriori*, plusieurs explications peuvent rendre compte de ce phénomène. D'une part, l'intensité de la sollicitation n'étant pas nulle, le travail mécanique effectué à 20% de PMA ne consiste pas en une simple gesticulation. On peut penser qu'à cette intensité, l'exercice physique engendre déjà l'apparition de phénomènes de facilitation. Il semblerait que l'effet stimulant ne soit pas suffisamment important et systématique pour induire une variation significative des performances de TR. En revanche, cette amélioration suffirait à compenser l'effet négatif de la tâche simultanée. D'autre part, l'hypothèse du partage attentionnel suppose que la gestion des ressources disponibles se fait par l'intermédiaire d'un réservoir unique de capacité limitée (Kahneman, 1973). Or, nous ne disposons pas d'argument nous permettant d'affirmer qu'une tâche de locomotion, sans aucune exigence particulière vis-à-vis du maintien d'une fréquence gestuelle imposée, sollicite les mêmes ressources attentionnelles qu'une tâche de TR. Si effectivement, la tâche de locomotion et la tâche cognitive sollicitent des ressources distinctes alors l'absence de dégradation au cours de la tâche simultanée est tout à fait logique et concevable.

Dans cette étude, trois intensités d'exercice différentes ont été manipulées afin d'isoler l'effet négatif de la double tâche. En effet, la comparaison entre les performances obtenues au repos et à 20% de PMA a été effectuée afin d'estimer les conséquences de la réalisation des deux tâches simultanées, tandis que la comparaison entre les performances à 20% et à 50% de PMA a été réalisée afin d'évaluer exclusivement l'effet de facilitation induit par l'exercice physique. Le fait qu'aucune différence n'apparaisse entre les performances au repos et à 20% de PMA ne justifie donc pas l'utilisation ultérieure de cette dernière intensité d'exercice dans la mise en place de nouveaux protocoles expérimentaux. L'effet d'amélioration induit par l'exercice physique peut être directement appréhendé par une comparaison des performances obtenues au repos à celles obtenues à 50% de PMA.

EFFETS DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION

D'une part, les résultats du test de détermination de fréquence critique de fusion (FCF) et des deux questionnaires de sensations subjectives confirment l'apparition de phénomènes de facilitation permettant de maintenir constant le niveau de performances à 20% de PMA. D'autre part, ils apportent également des arguments en faveur d'une augmentation du niveau d'éveil cortical et de l'état de vigilance des sujets à la suite d'un exercice réalisé à 50% de PMA.

Lorsque la tâche de TR est effectuée au repos, la diminution des valeurs de FCF observée après la tâche suggère une baisse du niveau d'éveil cortical des sujets. Le caractère monotone et répétitif de la tâche semble être la principale cause de ce fléchissement. La diminution du niveau d'éveil des sujets semble correspondre à l'apparition d'un phénomène de fatigue centrale. En effet, les résultats d'une précédente étude au cours de laquelle la tâche de TR était réalisée dans des conditions sous-optimales de vigilance sont relativement similaires (Davranche & Audiffren, 2002a). A 20% de PMA, cet effet notable disparaît et aucune différence n'apparaît plus entre les valeurs enregistrées avant et après la tâche de TR. Bien que l'intensité de la sollicitation soit relativement faible, ses répercussions semblent suffisamment importantes pour compenser l'effet négatif observé au repos et permettent au sujet de maintenir un niveau de performance constant. Lorsque l'intensité de l'exercice augmente, les valeurs de FCF post-exercice sont plus élevées que les valeurs pré-exercice. Ce dernier résultat suggère clairement une augmentation du niveau d'éveil cortical des sujets immédiatement après la réalisation d'un exercice physique modéré (50% de PMA).

L'augmentation moyenne des valeurs de FCF avec l'exercice reste cependant relativement faible ($M = 0.5$ hertz) et l'utilisation d'une fréquence d'incrémentation de faible amplitude semble nécessaire à la mise en évidence de cette augmentation de la FCF (1 hertz/sec). L'absence d'effet, au niveau de l'écart entre les valeurs ascendantes et descendantes, laisse penser que la stratégie de discrimination du signal est identique au cours des différentes sessions. Le protocole expérimental de cette étude ne permet pas d'écarter l'éventualité d'un changement de stratégie vis-à-vis de la discrimination du signal. Le jugement discriminatoire sensoriel des sujets ne semble pas être à l'origine de cette augmentation des valeurs de FCF mais ces résultats doivent tout de même être considérés avec une certaine retenue.

EFFETS DE L'EXERCICE SUR L'ÉTAT D'HUMEUR SUBJECTIF

Les résultats obtenus par l'intermédiaire des deux questionnaires de sensations subjectives confirment partiellement les précédents résultats comportementaux. En effet, l'utilisation d'une échelle visuelle analogique renforce les arguments en faveur d'une augmentation de l'état de vigilance des sujets après l'exercice, par contre elle suggère simplement une diminution de l'état de vigilance au cours de la session repos. Le POMS-f, quant à lui, semble moins sensible aux changements d'état mesurés de façon répétée au cours d'une même session expérimentale. L'utilisation de ce questionnaire n'infirme pas, mais ne confirme pas non plus les observations précédentes. Elle n'apporte en réalité aucune information complémentaire. Cette constatation renforce l'idée que l'utilisation d'échelles visuelles analogiques (sans graduation, ni repère) est préférable à l'utilisation d'une échelle de type Likert lorsqu'il s'agit d'appréhender l'évolution de variables subjectives telles que les changements d'humeur au cours du temps.

LOCALISATION DE L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR L'EXERCICE

Tout d'abord, conformément aux résultats de la littérature, chacun des facteurs cognitifs manipulés affecte la performance et les effets des trois facteurs sont additifs. Le postulat d'influence sélective (Sternberg, 1969), pré-requis indispensable à l'utilisation de la MFA, est confirmé par l'observation de ce patron d'additivité entre les trois facteurs expérimentaux tant au niveau du TR moyen qu'au niveau de la variance du TR. Ensuite, l'effet des différents facteurs cognitifs ainsi que l'effet de facilitation induit par l'exercice sont indéniables au niveau des performances de TR. Pourtant, aucun patron d'interaction n'a pu être mis en évidence entre les différents facteurs. L'interprétation des résultats de cette étude n'est pas sans poser problème car l'obtention d'un patron d'additivité entre deux facteurs n'est pas aussi facile à interpréter qu'un patron d'interaction. En effet, lorsque deux facteurs interagissent et que les codes de sortie des étapes sont constants, ces facteurs affectent invariablement un certain nombre d'étapes en commun. Au contraire, l'interprétation d'une additivité est moins évidente car elle est déduite de la non significativité d'une interaction. Or, l'analyse de variance ne permet d'estimer le risque de faire une erreur de type II, c'est à dire le risque d'accepter l'hypothèse nulle à tort. De plus, il est pratiquement impossible de savoir, par l'intermédiaire d'une analyse de variance, si deux variables n'interagissent pas à un faible degré. Une additivité ne peut donc véritablement être considérée que comme une absence

réelle d'interaction que si elle s'avère robuste. Ce principe de précaution étant rappelé, les résultats de cette étude suggèrent tout de même que chacun des facteurs manipulés affectent des étapes de traitement différentes, et que l'exercice n'influence ni le stade d'extraction des caractéristiques du signal, ni le stade de sélection de la réponse, ni le stade d'ajustement moteur. Les résultats comportementaux répliquent partiellement ceux d'Arcelin *et al.* (1998) mettant en évidence un patron d'additivité entre l'exercice et la compatibilité stimulus-réponse. Cependant, l'absence d'interaction observée entre l'exercice et la durée de la période préparatoire ne confirme pas l'influence sélective de l'exercice au niveau des stades périphériques moteurs suggérée par ces mêmes auteurs.

Malgré tout, les conclusions de cette étude ne sont qu'en partie satisfaisantes car elles semblent peu compatibles avec certaines observations antérieures. En effet, l'absence d'interaction entre l'exercice physique et les différents facteurs expérimentaux manipulés dans cette étude semble relativement contradictoire avec un certain nombre de travaux mettant en relation l'exercice et les systèmes cholinergique, dopaminergique et noradrénergique. Les résultats de Peyrin *et al.* (1987), de Chmura *et al.* (1994, 1998) et de Pagliari et Peyrin (1995a, 1995b) suggèrent notamment qu'il existerait un lien étroit entre l'amélioration des performances cognitives et la libération de catécholamines centrales et périphériques au cours de l'exercice. Si comme le suggèrent McGuinness et Pribram (1980), les différents systèmes de neurotransmetteurs influencent de manière spécifique le fonctionnement cérébral, tout nous pousse à croire que l'exercice physique devrait interagir avec certains facteurs cognitifs connus pour affecter des étapes de traitement spécifiques. Le fait que nos résultats ne confirme pas l'influence sélective de l'exercice au niveau des stades périphériques moteurs, n'infirme en rien l'hypothèse d'Arcelin *et al.* (1998). Malgré le fait que la MFA reste une méthode heuristique valide, la puissance inférencielle de cette méthode semble cependant avoir ses limites. Sur la base de cette logique, un certain nombre d'études n'ont pas réussi à localiser l'effet d'un facteur expérimental donné (i.e., nicotine, protoxyde d'azote, fluvoxamine) par l'intermédiaire de l'observation de patrons d'interaction au niveau du TR (Davranche & Audiffren, 2002a ; Fowler *et al.*, 2000 ; Rihet *et al.*, 1999). La mise en évidence exclusive de patrons d'additivité ne permet pas de conclure et pose de réels problèmes d'interprétation (Fowler *et al.*, 2000, 2001 ; Smulders & van der Molen, 2001). Dans le cadre de ce protocole, l'effet de l'exercice n'a cependant pas été testé sur l'ensemble des stades de traitement. Si on se réfère aux différentes étapes constituant le modèle de

Sanders (1983), aucun facteur affectant le stade de prétraitement du stimulus n'a été manipulé. Or, l'augmentation de niveau d'éveil mis en évidence par l'intermédiaire du test de fréquence critique de fusion plaide fortement en faveur d'un effet de l'exercice sur les processus sensoriels. Par conséquent, il nous semble nécessaire d'une part de répliquer les résultats observés au niveau de la fréquence critique de fusion, et d'autre part de manipuler l'intensité du signal afin de tester l'effet de l'exercice sur les processus périphériques sensoriels situés à l'entrée de la chaîne de traitement de l'information.

En résumé, les résultats de cette étude confirment qu'un exercice d'intensité sous-maximale (réalisé à 50% de PMA) induit un effet de facilitation des performances cognitives. De plus, ils montrent également qu'à une intensité moindre (20% de PMA), la réalisation d'un exercice permet de maintenir des performances constantes. Les répercussions de cet effet stimulant sont non seulement remarquables au niveau comportemental (TR), mais également au niveau des valeurs de FCF et de l'état de vigilance subjectif des sujets (échelle visuelle analogique). En contrepartie, les prédictions d'Arcelin *et al.* (1998) concernant la localisation de l'effet de l'exercice au niveau du stade d'ajustement moteur ne sont pas confirmées. La mise en place de protocoles alternatifs, visant à localiser l'effet de facilitation induit par l'exercice physique, par l'intermédiaire d'autres variables dépendantes que le TR moyen et d'autres méthodes que la MFA semble nécessaire.

EFFET DE L'EXERCICE SUR LES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION ET INFLUENCE DU TEMPS PASSE SUR LA TACHE*

INTRODUCTION

Dans le cadre du modèle cognitivo-énergétique (1983), Sanders distingue deux types de facteurs : les facteurs computationnels qui affectent les différents stades de traitement de l'information (niveau cognitif) et les facteurs énergétiques qui modulent le niveau d'énergie des trois mécanismes liés au contrôle de l'attention (niveau énergétique).

Les facteurs computationnels agissent directement sur les stades de traitement. Par exemple l'intensité du stimulus, la qualité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et l'incertitude temporelle affectent respectivement les stades de prétraitement du stimulus, d'extraction des caractéristiques, de sélection de la réponse et d'ajustement moteur. La manipulation des facteurs computationnels modifie la complexité de la tâche cognitive et raccourcit ou allonge la durée des étapes de traitement de l'information.

Les facteurs énergétiques ont, quant à eux, une influence indirecte car ils n'affectent pas directement la durée des stades de traitement mais agissent spécifiquement sur le fonctionnement des mécanismes énergétiques. La manipulation de facteurs énergétiques, augmente ou diminue la quantité de ressources allouées par les mécanismes énergétiques d'éveil, d'effort et d'activation aux stades de traitement. Par voie de conséquence, le temps de traitement nécessaire aux différentes étapes est modifié par la manipulation des facteurs énergétiques. Ainsi, les barbituriques agiraient sur le mécanisme d'éveil, les amphétamines sur le mécanisme d'activation et la privation de sommeil affecterait les deux mécanismes énergétiques (Sanders, 1983).

* DAVRANCHE, K, AUDIFFREN, M. & DENJEAN A. (SOUMIS). A DISTRIBUTIONAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF PHYSICAL EXERCISE ON CHOICE REACTION TIME TASK.

D'après Sanders, deux méthodes permettent de définir la nature computationnelle ou énergétique d'un facteur expérimental. La première méthode consiste à étudier les conséquences de la manipulation d'un facteur sur la forme de la distribution de TR. Si un facteur est de nature computationnelle, la manipulation de ce facteur doit affecter l'ensemble des essais. D'une modalité à l'autre, on s'attend donc à observer un simple décalage de l'ensemble de la distribution de TR. En revanche, si un facteur est de nature énergétique, les conséquences de la manipulation de ce facteur doivent apparaître essentiellement au niveau de la fin de la distribution et être quasiment absentes voire nulles sur le reste de la distribution. La deuxième méthode consiste à étudier l'évolution de l'amplitude de l'effet du facteur manipulé en fonction du temps passé sur la tâche. Si un facteur est de nature computationnelle l'amplitude de l'effet doit être identique quel que soit le temps passé sur la tâche. On notera que certaines précautions méthodologiques devront être prises afin d'éviter l'apparition d'un effet d'apprentissage pouvant biaiser cette observation. Au contraire, si un facteur est de nature énergétique, on s'attend à ce que l'amplitude de l'effet soit plus importante en fin de tâche.

A notre connaissance, seule l'étude d'Arcelin *et al.* (1998) a tenté de définir la nature computationnelle ou énergétique de l'effet de l'exercice physique sur le traitement de l'information. Au cours de ce travail, l'effet d'un exercice d'intensité sous-maximale a été appréhendé par l'intermédiaire d'une analyse de distributions des TR. Les résultats de cette étude suggèrent que l'exercice affecte uniquement la fin de la distribution de TR. Interprété dans le cadre des prédictions de Sanders (1983), ce dernier résultat suggère une action indirecte de l'exercice sur les étapes de traitement de l'information par le biais des mécanismes énergétiques.

Cependant, certains résultats expérimentaux remettent fortement en question la pertinence de l'utilisation de l'analyse des distributions de TR dans le cadre de cette logique d'inférence. Par exemple, Smulders, Kenemans, Jonkman et Kok (1997) ont étudié l'effet de la privation de sommeil en manipulant trois facteurs computationnels (la qualité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et l'intervalle inter-essais) connus pour affecter des étapes de traitements distincts (le stade d'extraction des caractéristiques, de sélection de la réponse et d'ajustement moteur). Contrairement aux prédictions de Sanders, aucune distinction n'a pu être faite entre les effets des variables computationnelles et les effets des variables

énergétiques manipulées suite à l'analyse des distributions de TR. En revanche, d'après les résultats de cette étude, l'évolution des performances cognitives en fonction du temps passé sur la tâche permet d'établir cette distinction.

Dans le cadre de notre étude, l'effet de facilitation induit par la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale modérée a été appréhendé à la fois par l'intermédiaire d'une analyse des distributions de TR et de l'évolution des performances en fonction du temps passé sur la tâche. Les objectifs de ce travail étaient 1) de préciser l'effet de l'exercice grâce à l'utilisation de l'analyse des distributions ; 2) d'étudier l'évolution de l'amplitude de l'effet de l'exercice en fonction du temps passé sur la tâche ; 3) de déterminer la nature computationnelle ou énergétique de l'exercice en confrontant les deux méthodes d'inférence proposées par Sanders (1983).

Les résultats de cette étude devraient nous permettre, à la fois, de vérifier les résultats observés par Arcelin *et al.* (1998) et de mettre à l'épreuve les prédictions de Sanders (1983) concernant l'utilisation des distributions de TR afin de déterminer la nature computationnelle ou énergétique d'un facteur. Si les deux méthodes d'inférence proposées par Sanders s'avèrent pertinentes, on devrait d'une part observer une augmentation de l'amplitude de l'effet de facilitation en fin de tâche et, d'autre part, cet effet de facilitation devrait essentiellement apparaître au niveau de la queue de la distribution (réponses lentes).

METHODE

SUJETS

Pour cette deuxième expérience, les sujets ont été sélectionnés en fonction de leur quantité de pratique sportive par semaine et de la nature de cette pratique. La population d'étude était composée de 11 sujets (4 filles et 7 garçons) spécialistes en sports de prise de décisions (sport collectifs, sports de raquettes ou sports de combat) et effectuaient en moyenne 4 entraînements par semaine (± 2).

Leur valeur moyenne de $\dot{V}O_2$ max était respectivement de 40 ml.min⁻¹.kg⁻¹ (± 6) pour les filles et de 48 ml.min⁻¹.kg⁻¹ (± 4) pour les garçons. Leur PMA moyenne était respectivement de 229 watts (± 36) pour les filles et de 336 watts (± 32) pour les garçons. Le premier seuil ventilatoire des sujets (déterminé visuellement à partir de la cinétique d'évolution de $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ et $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$) a été estimé à une puissance de 149 watts (± 17) pour les filles et de 166 watts (± 33) pour les garçons (Annexe 1).

TACHE ET APPAREILLAGE

Tâche de temps de réaction de choix

Le dispositif expérimental utilisé était identique à celui présenté dans la première expérience. La tâche cognitive consistait à actionner deux manettes, respectivement avec la main droite ou la main gauche vers le haut ou vers le bas, en fonction du stimulus visuel présenté. Quatre stimuli différents pouvaient être présentés aux sujets de manière aléatoire. Chaque stimulus était associé à une réponse motrice déterminée et le sujet était invité à répondre le plus rapidement possible sans commettre d'erreur dans la direction indiquée par l'orientation de la pointe d'une flèche.

Au cours du protocole expérimental, la qualité du signal de réponse était intacte et la durée de la période préparatoire était constante (500 ms). Après chaque essai, une connaissance du résultat était donnée au sujet. Elle concernait soit la rapidité d'exécution lorsque la réponse était correcte, soit la nature de l'erreur commise : erreur d'anticipation (TR < 150 ms), erreur d'omission (TR > 2000 ms), erreur de décision (erreur de côté, erreur de direction ou erreur double).

Epreuve de double tâche

Au cours du protocole expérimental, le sujet était confronté à une épreuve de double tâche consistant à réaliser la tâche de TRC au cours d'un exercice de pédalage sur ergocycle. L'exercice physique était une épreuve de 20 minutes, réalisée à une intensité constante et

sous-maximale (90 % du seuil ventilatoire). La fréquence de pédalage était librement choisie et la charge relative de travail était déterminée individuellement en fonction des performances de chaque sujet obtenues au cours d'un test préliminaire d'effort maximal.

L'épreuve de double tâche commençait systématiquement par une simple tâche de pédalage réalisée pendant 3 minutes afin de stabiliser la cadence de pédalage et les différents paramètres physiologiques. La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage étaient enregistrées de manière continue par l'intermédiaire de deux Polars (Sport tester systems) pendant toute la durée de l'exercice. Aucune information concernant ces deux variables n'était donnée en cours d'exécution. Le sujet avait simplement pour consigne préalable d'essayer de maintenir une fréquence de pédalage constante pendant toute la durée de l'exercice.

Fréquence Critique de Fusion (FCF)

Le dispositif expérimental utilisé était identique à celui présenté au cours de la première expérience (modèle 12021*C, Campden Instruments). La fréquence de clignotement des diodes lumineuses évoluait sur un continuum allant de 0 à 100 hertz. La fréquence d'incrémentement des diodes était de 2 hertz par seconde lors d'une première série et de 4 hertz par seconde lors d'une deuxième série. L'ordre de réalisation des deux séries était contrebalancé entre les différents sujets (Annexe 2a). Chacune des deux séries était composée de six essais consécutifs effectués alternativement, en phase ascendante et en phase descendante.

PROCEDURE

Après avoir signé une feuille de consentement, chaque sujet participait à un test préliminaire d'effort maximal, à une session d'apprentissage et à une session expérimentale.

L'épreuve d'effort maximal, réalisée au Service d'Explorations Fonctionnelles Respiratoires du Centre Hospitalier Universitaire de Poitiers, et la détermination du seuil ventilatoire ont été effectués selon les modalités définies dans la partie théorique de ce mémoire. L'objectif de ce test triangulaire était de mesurer le $\dot{V}O_2$ max et de déterminer le

seuil ventilatoire afin de calculer la puissance mécanique de la session expérimentale pour chaque sujet.

La session d'apprentissage consistait à réaliser autant de séries de TR (40 essais) qu'il était nécessaire afin d'obtenir une variabilité des performances inférieure à 17% et d'un pourcentage d'erreurs inférieur à 5% (Sanders, 1980 ; Sanders, 1990). Pendant cette phase d'apprentissage, la qualité des images était intacte et la durée de la PP était fixée à 1000 msec.

Au cours de la session expérimentale, le sujet devait effectuer 2 séries de 200 essais réussis de TR. La durée de passation d'une série de 200 essais était d'environ 17 minutes et une période de repos était accordée au sujet entre les deux séries. Le sujet effectuait une première série de TR au repos et une deuxième série à l'exercice. L'ordre des séries était contrebalancé entre les différents sujets (Annexe 2b). La durée de la période de récupération était déterminée en fonction du temps nécessaire pour que la fréquence cardiaque du sujet revienne à des valeurs proches de celles enregistrées avant la tâche. Avant et après la tâche de TR, le sujet effectuait deux séries de détermination de fréquence critique de fusion (l'une avec une fréquence d'incrémentation de 2 hertz par seconde et l'autre de 4 hertz par seconde).

TRAITEMENT DES DONNEES

Variables chronométriques et taux d'erreurs de décision

Lors du traitement des données, seuls les 200 essais de TR ayant donné lieu à la production d'une réponse correcte ont été pris en considération. Lorsque le sujet fournissait une réponse incorrecte, la nature de l'erreur commise était enregistrée et l'essai non réussi était systématiquement représenté plus tard au cours de la série. Les TR enregistrés à la suite d'erreurs d'anticipation, d'erreurs d'omission ou d'erreurs de décision ont systématiquement été exclus des analyses. Le pourcentage d'erreurs de décision a quant à lui fait l'objet d'un traitement à part entière, afin de vérifier l'absence d'un changement de stratégie au niveau de la fonction d'échange vitesse-précision d'une condition expérimentale à l'autre. Le pourcentage d'erreurs de décision a été calculé en prenant en considération le nombre total d'essais réalisés par chaque sujet dans les deux conditions expérimentales : nombre d'erreurs

de décision / (nombre d'essais réussis + nombre d'essais incorrects) x 100. Le traitement statistique a été effectué à partir de la transformation arcsinus du taux d'erreurs (Winer, 1970).

Distributions de temps de réaction

Les données individuelles recueillies dans chaque condition expérimentale (200 essais) ont été ajustées à une fonction Ex-Gaussienne à l'aide du logiciel PASTIS (Programme d'Analyse Statistique de Tendances et de Distribution) de Cousineau et Larochelle (1997). Les différents paramètres de la fonction, Mu (μ), Sigma (σ) et Tau (τ), ont été déterminés d'après la technique de plus forte probabilité. Les représentations graphiques des distributions de TR, présentées sous la forme de fonction de densité cumulée, ont été obtenues à partir de la vincentisation des distributions moyennes en 10 tranches de 20 essais. L'indice delta a également été calculé d'après les données vincentisées pour chaque condition expérimentale (pour des détails se référer à la Partie théorique – *Analyse de distributions de temps de réaction*).

RESULTATS

STATISTIQUES

Afin d'évaluer les effets de l'exercice sur les distributions de TR, les différentes variables dépendantes ont été analysées par l'intermédiaire d'analyses de variance (ANOVA). Un test de correction des degrés de liberté (ajustements de Greenhouse-Geisser) a été systématiquement réalisé lorsqu'un facteur à mesures répétées comportait plus de deux modalités. Lors de l'obtention d'une interaction significative, une comparaison de moyennes a été effectuée par l'intermédiaire d'une analyse a posteriori de Newman-Keuls. Le seuil de signification pour l'ensemble des résultats a été fixé à une valeur alpha égale à .05.

Dans cette partie, nous commencerons par présenter les résultats relatifs à la fréquence cardiaque, la fréquence de pédalage et à l'effet de l'exercice sur l'état énergétique des sujets à partir des valeurs de FCF. Les changements observés au niveau du TR, de la variance du TR

et du taux d'erreurs de décision seront ensuite présentés. Enfin, nous verrons de façon plus détaillée l'évolution du TR et du taux d'erreurs en fonction du temps passé sur la tâche. Nous finirons par présenter l'effet de l'exercice sur la forme de la distribution de TR.

FREQUENCE CARDIAQUE ET FREQUENCE DE PEDALAGE

La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage ont été analysées au cours de trois périodes de temps : entre la 6^{ème} et la 9^{ème} minute, entre la 11^{ème} et la 14^{ème} minute et entre la 16^{ème} et la 19^{ème} minute. Ce traitement statistique a été réalisé dans le but d'objectiver la manipulation de l'intensité de la sollicitation physiologique et de suivre l'évolution de la fréquence de pédalage au cours des 20 minutes d'exercice. Le plan d'expérience de l'ANOVA était composé de 2 facteurs à mesures répétées : un facteur à trois modalités (période) et d'un facteur à deux modalités (intensité de l'exercice).

Au niveau de la fréquence cardiaque (FC), suite à des problèmes d'acquisition, les données d'un sujet n'ont pu être exploitées. L'analyse statistique a donc été réalisée sur les données expérimentales de 10 sujets. Les résultats mettent en évidence une interaction entre l'intensité d'exercice et la période ($F(2, 18) = 8.42, p < .05$). En condition de repos, aucune différence significative n'apparaît entre les trois périodes de temps ($\underline{M} = 75 \text{ bat.min}^{-1}$). En revanche, dans la condition exercice, le test de Newman-Keuls met en évidence une augmentation de la FC entre la première et la deuxième période de temps ; elle passe de 132 bat.min^{-1} à 137 bat.min^{-1} . Aucune autre différence significative n'est observée de la 16^{ème} à la 19^{ème} minute ($\underline{M} = 139 \text{ bat.min}^{-1}$).

Au niveau de la fréquence de pédalage (FP), un effet principal du facteur période a été observé ($F(2, 20) = 6.66, p < .05$). Un test de Newman-Keuls montre que la FP augmente entre la première et la deuxième période de temps (de la 6^{ème} à la 9^{ème} minute : $\underline{M} = 68 \text{ tr.min}^{-1}$; de la 11^{ème} à la 14^{ème} minute : $\underline{M} = 70 \text{ tr.min}^{-1}$). Aucun autre effet n'est observé de la 16^{ème} à la 19^{ème} minute ($\underline{M} = 71 \text{ tr.min}^{-1}$).

EFFET DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION

Le plan d'expérience de l'ANOVA était composé de 2 facteurs à deux modalités : l'intensité de l'exercice (repos versus exercice) et la fréquence d'incrémentation (2 hertz versus 4 hertz). Aucun effet significatif, ni aucune interaction ne s'est avéré significatif que soit au niveau des valeurs moyennes de FCF ou au niveau de l'écart entre les valeurs ascendantes et descendante de FCF.

EFFET DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION, LA VARIANCE DU TEMPS DE REACTION ET LE TAUX D'ERREURS DE DECISION

L'effet de l'exercice sur les performances de TR a été analysé par l'intermédiaire d'une ANOVA. Une première analyse a été effectuée sur les valeurs de TR, une seconde analyse sur la variance du TR et une dernière sur la transformation arcsinus du taux d'erreurs de décision. Le plan d'expérience de ces différentes analyses était composé d'un facteur à mesures répétées à deux modalités : l'intensité de l'exercice (repos versus exercice).

Un effet principal de l'intensité de l'exercice a été observé au niveau des valeurs de TR moyen ($F(1, 10) = 6.39, p < .05$). Comparativement aux performances cognitives enregistrées au repos ($M = 497$ msec), les TR sont plus courts pendant la double tâche réalisée à 90% du seuil ventilatoire ($M = 484$ msec).

Aucun effet de l'intensité de l'exercice n'a été observé au niveau de la variance du TR ($F(1, 10) = 0.15, p = .70$).

Un effet marginal de l'intensité de l'exercice a été observé au niveau du taux d'erreurs de décision ($F(1, 10) = 4.91, p = .05$). La proportion d'erreur de décision passe de 0.2% à 0.3% entre les conditions repos et exercice. L'analyse de l'évolution du taux d'erreurs en fonction du temps passé sur la tâche, montre cependant que les changements observés au niveau du TR ne reflètent pas un changement de stratégie vis-à-vis du compromis vitesse-précision (se référer au paragraphe suivant). Nous considérerons donc que les sujets ont conservé la même stratégie au cours des deux conditions expérimentales et que la diminution du TR moyen est bien liée à la manipulation de l'intensité de l'exercice.

EFFET DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION ET SUR LE TAUX D'ERREURS DE DECISION EN FONCTION DU TEMPS PASSE SUR LA TACHE

Afin d'étudier l'évolution des performances en fonction du temps passé sur la tâche, les 200 essais de TR ont été découpés en 8 blocs de 25 essais. Les données obtenues au cours des deux conditions expérimentales ont ensuite été comparées deux à deux par l'intermédiaire de 8 comparaisons planifiées (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 et C8) (Figure 32).

Au cours des 4 premiers blocs d'essais, la différence de performance entre les deux conditions n'est pas significative et les deux courbes évoluent parallèlement. A partir du 5^{ème} bloc d'essais, l'écart entre les performances enregistrées au repos et à l'exercice augmente ; on observe une dissociation des deux courbes. Une différence significative apparaît entre les deux conditions à partir du 6^{ème} bloc d'essais ($\Delta = -18$ msec ; $F(1,10) = 6.66$, $p < .05$). Au 7^{ème} bloc d'essais, le TR moyen continue à diminuer mais le seuil de significativité n'est pas atteint certainement à cause d'une trop grande variabilité interindividuelle ($\Delta = -23$ msec ; $F(1,10) = 2.82$, $p = .12$). L'écart entre les conditions persiste au cours du dernier bloc ($\Delta = -23$ msec ; $F(1,10) = 5.13$, $p < .05$).

Pour chacun des 8 blocs de 25 essais de TR, une analyse statistique a également été effectuée sur la transformation arcsinus du taux d'erreurs de décision enregistré au cours de cette période de temps. Pour chaque condition expérimentale, les taux d'erreurs de décision ont été comparés deux à deux par l'intermédiaire de 8 comparaisons planifiées (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 et C8) (Figure 33).

Aucun effet de l'exercice sur la transformation arcsinus du taux d'erreurs n'a été observé sur aucun bloc d'essais (C1 : $F(1,10) = 1.16$, $p = .31$; C2 : $F(1,10) = 2.2$, $p = .17$; C3 : $F(1,10) = 3.2$, $p = .10$; C4 : $F(1,10) = 1.70$, $p = .22$; C5 : $F(1,10) = 1.96$, $p = .19$; C6 : $F(1,10) = 2.60$, $p = .14$; C7 : $F(1,10) = 0.07$, $p = .80$ et C8 : $F(1,10) = 0.65$, $p = .44$). Bien qu'aucune différence significative n'ait été observée au cours de ces comparaisons deux à deux, on peut remarquer que le taux d'erreurs a tendance à être légèrement plus élevé à l'exercice qu'au repos. Cette tendance s'inverse à partir du 7^{ème} bloc. Cette observation plaide

en faveur du fait que la facilitation du TR observée à l'exercice au cours du 8^{ème} bloc n'est pas due à une stratégie des sujets consistant à échanger la précision au profit de la vitesse.

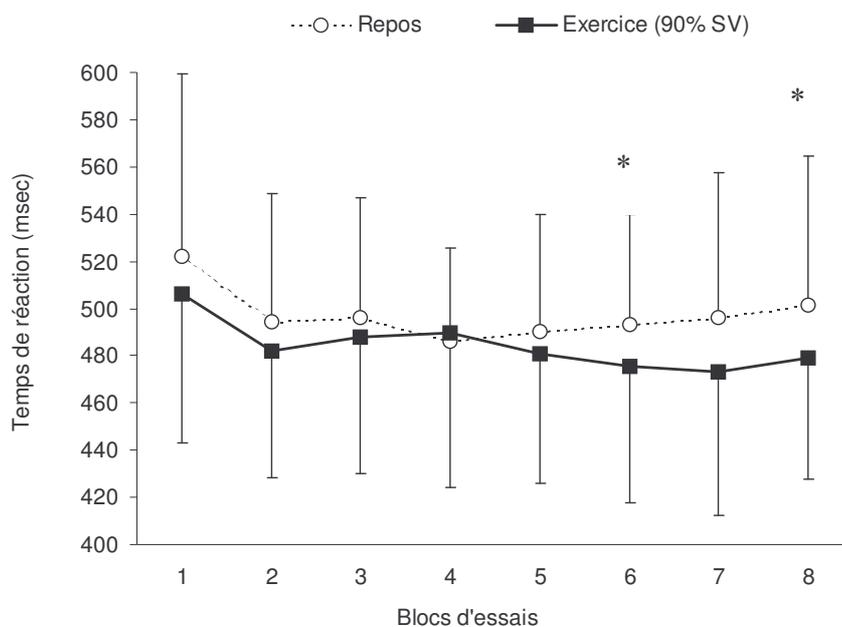


Figure 32. Evolution des performances de temps de réaction (et écart-types) au repos (-o-) et à l'exercice (-■-) en fonction du temps passé sur la tâche (* $p < .05$).

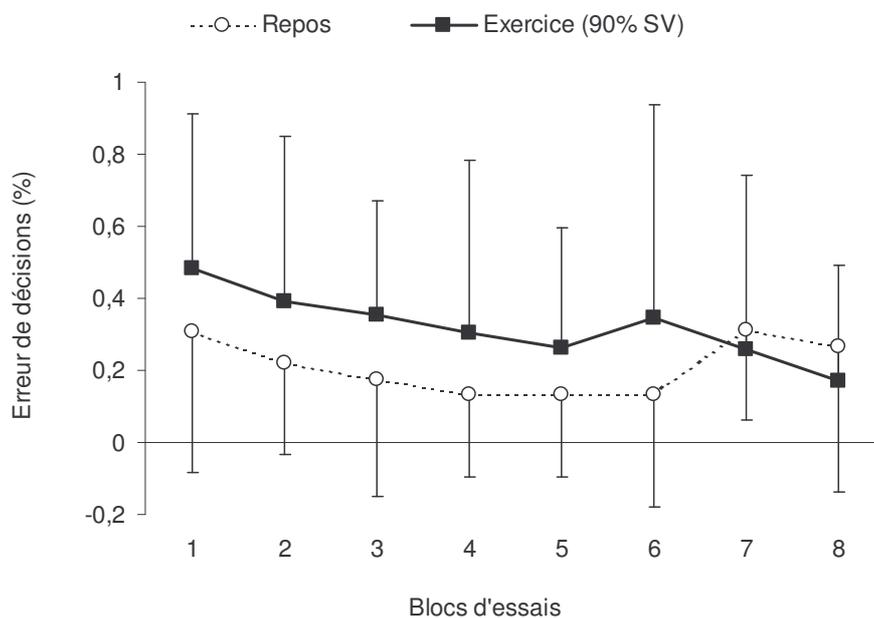


Figure 33. Evolution du taux d'erreur de décision (et écart-types) au repos (-○-) et à l'exercice (-■-) en fonction du temps passé sur la tâche (* $p < .05$).

EFFET DE L'EXERCICE SUR LES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION

Concernant les paramètres des distributions de TR, un effet de facilitation de l'exercice a été mis en évidence au niveau du paramètre μ (repos : $\underline{M} = 408$ msec versus exercice : $\underline{M} = 391$ msec ; $F(1, 10) = 9.27$, $p < .05$). Aucun effet de l'exercice n'a été observé sur le paramètre σ (repos : $\underline{M} = 37$ msec versus exercice : $\underline{M} = 32$ msec ; $F(1, 10) = 1.31$, $p = 0.28$), ni sur le paramètre τ (repos : $\underline{M} = 89$ msec versus exercice : $\underline{M} = 94$ msec ; $F(1, 10) = 0.26$, $p = 0.62$).

Avec l'exercice on observe un décalage de l'ensemble de la distribution vers la gauche, mais la forme de la courbe n'est pas modifiée (Figure 34). En agissant uniquement sur le paramètre μ de la distribution, l'exercice physique affecte l'ensemble des TR (les plus courts aussi bien que les plus longs). De plus, bien qu'il soit de faible amplitude, l'indice Delta (encadré figurant à l'intérieur de la Figure 34) montre que cet effet est de même amplitude pour l'ensemble des TR (10-15 ms).

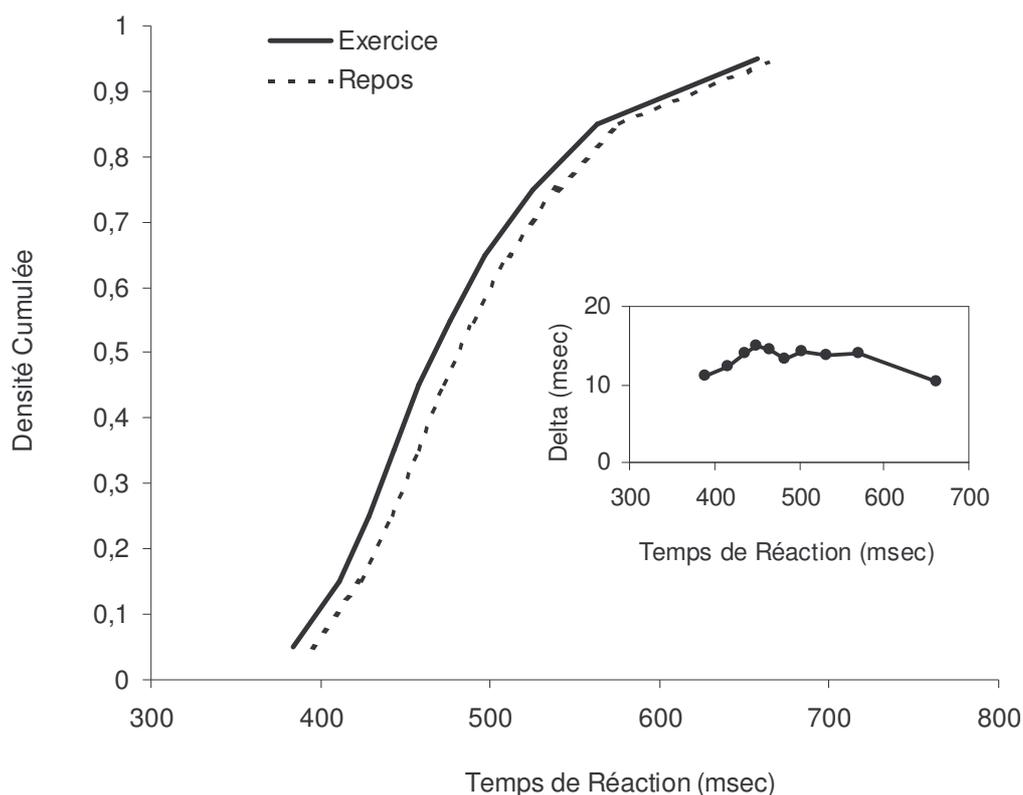


Figure 34. Distribution des temps de réaction (msec) au repos (---) et à l'exercice () et indice Delta (msec).

DISCUSSION

Ce protocole expérimental a été mis en place afin de déterminer la nature computationnelle ou énergétique de l'effet d'un exercice physique, de préciser les caractéristiques de cet effet de facilitation grâce à une analyse des distributions de TR, et de vérifier la pertinence de l'utilisation des distributions de TR dans la détermination de la nature directe ou indirecte d'un facteur au niveau de la chaîne de traitement de l'information.

Au cours de cette étude, les sujets étaient invités à effectuer une tâche de TRC au repos et en pédalant à une intensité correspondant à 90% de la puissance mécanique atteinte au premier seuil ventilatoire.

EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE

Les résultats observés au niveau de la fréquence cardiaque et de la fréquence de pédalage sont sensiblement les mêmes que ceux de la précédente expérience.

Etant donnée l'intensité de la sollicitation (90% du seuil ventilatoire), on considère classiquement que le principal mécanisme sollicité est le mécanisme aérobie. L'augmentation de la fréquence cardiaque observée au cours des deux protocoles expérimentaux semble donc essentiellement due à la mise en place de mécanismes de thermorégulation classiquement décrite en physiologie de l'exercice. La modification des mécanismes de thermorégulation étant généralement associée à une libération concomitante de noradrénaline, ce résultat suggère que l'influence de la durée de l'exercice sur la performance cognitive est liée à des changements dans le fonctionnement neuro-hormonal .

L'évolution de la fréquence de pédalage au cours de l'exercice confirme l'hypothèse d'une adaptation spontanée du sujet en fonction de la durée de l'épreuve et du type de fibres musculaires recrutées.

EFFETS DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION

Les résultats observés au niveau du test de fréquence critique de fusion (FCF) ne confirme pas l'hypothèse d'une élévation du niveau d'éveil cortical des sujets avec l'exercice. Ce résultat est contradictoire à celui de la première expérience, au cours de laquelle une augmentation des valeurs de FCF avait été observée lorsque la fréquence de clignotement était incrémentée d'un hertz par seconde. L'absence d'effet de l'exercice sur la FCF, dans cette deuxième étude, est intéressante car elle paraît liée à la fréquence d'incrémentation des diodes lumineuses. En effet, il semblerait que lorsque l'effet du facteur étudié est de faible amplitude, comme c'est le cas pour l'exercice, une fréquence d'incrémentation de 2 hertz ou de 4 hertz par seconde soit trop importante pour mettre en évidence une élévation du niveau d'éveil cortical des sujets. Ces résultats suggèrent que le choix de la fréquence d'incrémentation des diodes lumineuses est un point méthodologique primordial qu'il est essentiel de prendre en considération. D'autre part, l'élévation du niveau d'éveil cortical des sujets avec l'exercice n'ayant jamais été mise en évidence en dehors de la première étude, il semble nécessaire de reproduire ce résultat ultérieurement afin de confirmer cette hypothèse.

EFFETS DE FACILITATION DES PERFORMANCES COGNITIVES

Les résultats comportementaux observés au niveau des performances répliquent ceux de nombreuses études ayant observé un effet de facilitation des performances cognitives lors de la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale modérée. Sans augmenter la variabilité de leur performance, les sujets sont plus rapides pendant l'exercice ($\Delta = -13$ msec) et ce changement ne se fait pas au détriment de la précision de leur réponse. De plus, les résultats de cette étude montrent, d'une part, que l'amplitude de l'effet augmente avec le temps passé sur la tâche et, d'autre part, que l'ensemble des TR est affecté de façon identique.

L'évolution de l'écart entre les performances enregistrées au repos et à l'exercice révèle une augmentation de l'amplitude de l'effet de l'exercice en fin de tâche. Lorsque les sujets effectuent la tâche cognitive au repos, on observe une dégradation de la performance en fin de tâche. En revanche, pendant l'exercice c'est au cours des derniers blocs d'essais que les sujets sont les plus rapides.

L'apparition de phénomène d'habitude et de fatigue centrale semble être à l'origine de la baisse de performance observée au repos. Au début de l'épreuve, on peut penser que la

motivation des sujets est suffisamment importante pour leur permettre de maintenir leurs performances à un niveau optimal par l'intermédiaire du mécanisme d'effort. Par la suite, l'efficacité du mécanisme d'effort semble décroître, le déséquilibre énergétique du système n'étant plus compensé, la capacité d'adaptation de l'individu est dépassée. Le caractère monotone et répétitif de la tâche de TR provoque alors une baisse de performance. En revanche, pendant l'exercice cet effet de dégradation, due à un état sous-optimal ne pouvant être compensé par l'effort, n'apparaît pas et les sujets sont capables de maintenir leur niveau de performance constant tout au long de l'épreuve.

Des résultats semblables ont été observés au cours de précédentes études s'intéressant aux effets de la nicotine sur le traitement de l'information. En effet, suite à l'administration de nicotine Parkin *et al.* (1998) et Davranche et Audiffren (2002a) ont respectivement observé une diminution de l'effet de la privation de sommeil et de l'effet délétère d'un environnement soporifique. Les conséquences de la réalisation d'un exercice physique paraissent relativement similaires à celles induites par l'administration d'une drogue psychostimulante. En effet, il apparaît que le stress induit par l'exercice contribue à la stabilisation des performances malgré le caractère monotone de la tâche.

NATURE DE L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR L'EXERCICE

Les résultats de cette étude apportent des arguments en faveur de la nature énergétique de l'effet de l'exercice physique et confirment la nature énergétique de l'effet de monotonie de la tâche. En effet, les effets de ces deux facteurs sont plus importants en fin de tâche qu'en début de tâche. Les résultats observés au repos suggèrent que l'effet de monotonie provoque une baisse de performances en fin de tâche, tandis que les résultats observés à l'exercice suggèrent un maintien du niveau de performance malgré le caractère répétitif de la tâche. En revanche, l'analyse des distributions de TR ne confirme pas cette prédiction. Contrairement à l'étude d'Arcelin *et al.* (1998) l'ensemble des TR est affecté par l'exercice ce qui suggère une influence de nature computationnelle. Les résultats contradictoires de cette étude confirment les réserves précédemment émises vis-à-vis de l'utilisation de l'analyse des distributions de TR dans le but de déterminer la nature computationnelle ou énergétique d'un facteur. L'inconsistance des résultats nous amène donc à prendre position en faveur des prédictions

issues de l'analyse du temps passé sur la tâche et à infirmer les prédictions de Sanders (1983) concernant l'utilisation des distributions de TR afin de déterminer la nature computationnelle ou énergétique d'un facteur expérimental. Cependant, il semble nécessaire de confirmer la nature énergétique de l'effet de facilitation induit par l'exercice physique.

En résumé, les résultats de cette étude confirment l'apparition d'un phénomène de facilitation des performances de TR lors de la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale modérée (90% du seuil ventilatoire). L'étude de l'évolution de l'amplitude de l'effet de l'exercice avec le temps passé sur la tâche, nous a permis de mettre en évidence une augmentation de l'amplitude de la facilitation en fin de tâche. Ce résultat apporte un argument en faveur de la nature énergétique de l'exercice qu'il paraît cependant nécessaire de confirmer dans l'avenir. Contrairement aux propositions de Sanders (1983), l'analyse des distributions de TR ne semble pas être un outil d'inférence adapté à la détermination de la nature computationnelle ou énergétique d'un facteur expérimental. Cependant, l'analyse des distributions reste un outil intéressant car il permet d'étudier précisément l'influence d'un facteur expérimental. En effet, la comparaison des distributions de TR obtenues au repos et à l'exercice, nous a permis de mettre en évidence un parfait décalage de la distribution vers la gauche sans aucun changement de forme. Contrairement aux résultats d'Arcelin *et al.* (1998), l'ensemble de la distribution semble affecté par ce type d'exercice physique et l'amplitude de l'effet est la même pour tous les essais.

**LOCALISATION DE L'EFFET D'UN EXERCICE AU COURS D'UNE
TACHE DE TEMPS DE REACTION DE CHOIX : UNE ETUDE
ELECTROMYOGRAPHIQUE**

INTRODUCTION

Au cours de la première expérience présentée dans le cadre de ce mémoire, nous avons tenté de localiser l'effet de facilitation d'un exercice physique, au niveau de la chaîne de traitement de l'information, à l'aide de la MFA de Sternberg (1969). Cette expérience impliquait la manipulation de trois facteurs cognitifs connus pour affecter des étapes de traitement distinctes : la qualité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et l'incertitude temporelle. Malgré l'observation indéniable d'un effet de facilitation des performances de TR, aucun patron d'interaction n'a pu être mis en évidence entre l'exercice et les différents facteurs cognitifs manipulés. Les résultats suggèrent donc que l'exercice n'influence ni le stade d'extraction des caractéristiques du signal, ni le stade de sélection de la réponse, ni le stade d'ajustement moteur.

Au cours de ce protocole, l'effet de l'exercice n'a cependant pas été testé au niveau du stade de prétraitement du stimulus. Or, l'augmentation du niveau d'éveil cortical des sujets mis en évidence, lors de cette même étude, par l'intermédiaire d'un test de fréquence critique de fusion plaide fortement en faveur d'un effet de l'exercice sur les processus sensoriels. Par conséquent, il nous semble nécessaire dans un premier temps de répliquer les résultats observés au niveau de la fréquence critique de fusion et de manipuler l'intensité du signal afin de tester l'effet de l'exercice sur les processus périphériques sensoriels. De plus, l'absence d'interaction entre l'exercice physique et les différents facteurs expérimentaux manipulés semble relativement contradictoire avec un certain nombre de travaux mettant en relation l'exercice et les systèmes cholinergique, dopaminergique et noradrénergique. Dans un deuxième temps, il nous semble donc nécessaire de mettre en place un protocole alternatif,

visant à localiser l'effet de facilitation induit par l'exercice physique par l'intermédiaire d'une autre logique d'inférence que celle de la MFA de Sternberg (1969).

Cette troisième expérience a donc été mise en place afin de compléter les résultats expérimentaux précédents et de tenter de localiser à nouveau l'effet de facilitation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale. Le cadre d'inférence de ce travail repose à la fois sur la logique chronométrique et sur la méthode des facteurs additifs.

En effet, le début de l'activité électromyographique (EMG), du muscle agoniste impliqué dans la réponse, a été utilisé pour fractionner le TR en deux composantes chronométriques, reflétant chacune des processus : le temps pré-moteur (TPM) et le temps moteur (TM). L'angle α a également été déterminé afin de préciser un éventuel effet de l'exercice sur le TM (pour des détails se référer à la partie théorique - *Technique électromyographique et logiques d'inférence* et - *Analyse de la forme du tracé électromyographique*). De plus, l'intensité du signal, connue pour affecter le stade de prétraitement du stimulus, a été manipulée afin de tester l'influence sélective de l'exercice au niveau des processus périphériques sensoriels. L'objectif de cette étude était également de vérifier un certain nombre de résultats, à savoir : une augmentation de la fréquence critique de fusion (Expérience 1) et un décalage de l'ensemble de la distribution de TR (Expérience 2) lors de la réalisation d'un exercice physique.

Au cours de cette étude, nous nous attendons à reproduire un certain nombre de résultats précédemment observés dans la littérature. En ce qui concerne la manipulation de l'intensité du signal, le protocole expérimental devrait nous permettre d'observer : 1) une évolution du TR inversement proportionnelle à l'intensité du signal lumineux (Nissen, 1977) et 2) un effet de l'intensité du signal sur le TPM et 3) une absence d'effet sur le TM (Rihet *et al.*, 1999). Concernant la manipulation de l'intensité d'exercice, nous nous attendons à observer : 1) une diminution du TR pendant l'exercice comparativement au repos, 2) une augmentation de la fréquence critique de fusion immédiatement après l'exercice et 3) un décalage de l'ensemble de la distribution de TR vers la gauche.

Comme le suggèrent les précédents résultats, conformément à la MFA, si l'exercice physique affecte des processus périphériques sensoriels, une interaction entre l'intensité du signal et l'exercice devrait apparaître à la fois au niveau du TR et du TPM. Enfin, d'après la

logique chronométrique, si l'exercice affecte des étapes sensorielles et/ou centrales de traitement, la manipulation de l'intensité de l'exercice devrait induire des changements au niveau du TPM. Par ailleurs, si l'influence de l'exercice est localisée au niveau des étapes périphériques motrices (i.e., la vitesse de la contraction musculaire, une partie des étapes de programmation motrice, d'ajustement moteur et/ou d'exécution motrice) l'effet de facilitation devrait apparaître au niveau du TM.

METHODE

SUJETS

Au cours de cette expérience, 6 filles et 6 garçons ont été sélectionnés en fonction de leur quantité de pratique physique par semaine, de la nature de cette pratique et de leur condition physique. La population d'étude était composée de sujets sportifs, pratiquant au minimum un sport de prise de décisions plusieurs fois par semaine (sports collectifs, sports de raquettes ou sports de combat). L'ensemble des sujets avait un seuil ventilatoire situé à une puissance d'exercice inférieure ou égale à 50% de leur PMA.

La valeur moyenne de $\dot{V}O_2\text{max}$ était respectivement de $38 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ (± 5) pour les filles et de $50 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ (± 4) pour les garçons. La PMA moyenne était respectivement de 213 watts (± 21) pour les filles et de 325 watts (± 32) pour les garçons. Le seuil ventilatoire des sujets a été estimé à une puissance de 113 watts (± 14) pour les filles et de 171 watts (± 19) pour les garçons (Annexe 1).

TACHES ET APPAREILLAGE

Tâche de temps de réaction de choix

La tâche cognitive était une tâche de TRC à 2 éventualités. Le sujet devait répondre, le plus rapidement et le plus précisément possible, respectivement avec la main droite ou la main gauche en fonction de la position spatiale d'un signal visuel.

Le sujet était installé sur une bicyclette ergométrique, les avant-bras posés sur un support recouvert de mousse. Une planche de bois noire, dans laquelle étaient incrustées 3 diodes lumineuses, était placée face au sujet à une distance de 60 cm. Une diode (verte) située au centre du dispositif servait de point de fixation centrale. De chaque côté, deux autres diodes (rouges), situées à 7,5 cm de la diode centrale, servaient de signaux impératifs de réponse. La hauteur de la planche était systématiquement ajustée afin d'aligner la ligne horizontale formée par les 3 diodes avec le regard du sujet. Sur le guidon du vélo, deux poignées munies de boutons poussoir permettaient aux sujets de fournir leur réponse par une pression du pouce (750 grammes).

Chaque essai débutait par une période préparatoire fixe d'une durée de 500 ms précédant le signal impératif de réponse. Cette période préparatoire commençait avec l'apparition d'un signal préparatoire visuel d'une durée de 50 ms. Ce signal correspondait à l'allumage de la diode centrale servant de point de fixation. Une fois la diode centrale éteinte et la période préparatoire écoulée, le signal de réponse était présenté au sujet. Lorsque la diode située à gauche de la diode centrale s'allumait le sujet devait répondre avec la main gauche, et lorsque la diode située à droite s'allumait le sujet devait répondre avec la main droite. Le signal impératif de réponse restait allumé jusqu'à ce qu'une réponse soit donnée par le sujet. Au-delà de 1500 ms, si le sujet n'avait toujours pas donné de réponse, la diode s'éteignait et l'essai était considéré comme une erreur d'omission. L'intervalle inter-essais correspondait à une durée de 200 ms (Figure 35).

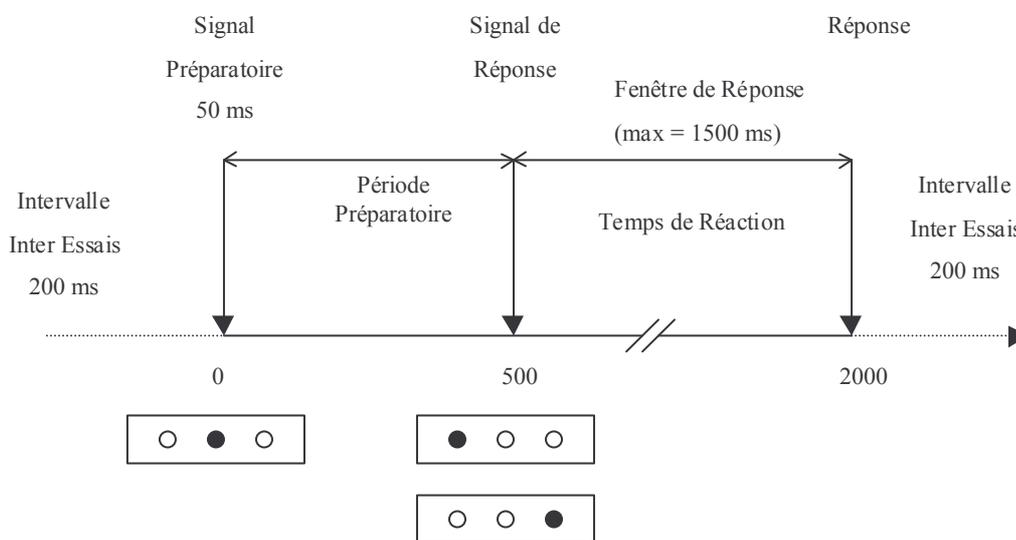


Figure 35. Déroulement temporel d'un essai lors de la tâche de temps de réaction de choix à 2 éventualités.

La rapidité et la précision de la réponse étaient enregistrées à chaque essai. Trois types d'erreurs étaient enregistrés : les erreurs d'anticipation ($TR < 150$ ms), les erreurs d'omission ($TR > 1500$ ms) et les erreurs de décision (réponse du côté opposé au signal de réponse). L'intensité lumineuse du signal impératif de réponse était variable et manipulée de façon aléatoire à l'intérieur des blocs d'essais. Pour un bloc d'essais donné, la moitié des essais correspondait à un signal de faible intensité lumineuse et l'autre moitié à un signal de forte intensité lumineuse.

Epreuve de double tâche

Le sujet était confronté à une épreuve de double tâche consistant à réaliser la tâche de TRC au cours d'un exercice de pédalage. L'exercice physique était une épreuve rectangulaire de 20 minutes, réalisée à une intensité sous-maximale (50% de $\dot{V}O_2\text{max}$), modérée (inférieure au premier seuil ventilatoire). Pour chaque sujet, la charge relative de travail était déterminée en fonction des performances réalisées au préalable lors d'un test triangulaire d'effort maximal. La cadence de pédalage était librement choisie, le sujet avait simplement pour consigne d'essayer de maintenir une fréquence de pédalage constante pendant toute la durée

de l'exercice. La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage étaient enregistrées en continue pendant toute la durée de l'exercice par l'intermédiaire de deux Polars (Sport tester systems).

Fréquence Critique de Fusion

Le dispositif expérimental utilisé était identique à celui présenté au cours des deux premières expériences (modèle 12021*C, Campden Instruments). La fréquence de clignotement des diodes lumineuses évoluait sur un continuum allant de 0 à 100 hertz. La fréquence d'incrémentation des diodes était d'un hertz par seconde.

Mesures électromyographiques

Deux électrodes Ag-Ag/Cl (Rochester) de 11 mm de diamètre ont été placées sur le muscle court fléchisseur du pouce '*Flexor pollicis brevis*' (Kendall & McCreary, 1988) de la main droite et de la main gauche. Après avoir décapé la surface de la peau à l'aide d'une pierre abrasive, la peau et les électrodes étaient nettoyées à l'éther. Une fois les cupules des électrodes remplies de gel conducteur, les deux électrodes étaient ensuite positionnées à une distance d'environ 2 cm l'une de l'autre. Une troisième électrode en plomb, entourée d'une éponge imbibée d'eau, était enroulée autour du poignet droit du sujet, puis reliée à la masse. L'activité EMG était enregistrée sur une période de 1700 ms. L'enregistrement commençait 200 ms avant la présentation du signal impératif de réponse et s'arrêtait 1500 ms après. Le signal EMG était amplifié (gain 10000, filtre 1 kHz) et échantillonné (2 kHz).

PROCEDURE

Après avoir signé une feuille de consentement, chaque sujet sélectionné participait à un test de détermination de $\dot{V}O_2\text{max}$, à une phase de familiarisation avec la tâche de TR et à une session expérimentale.

L'épreuve d'effort maximal, réalisée au Service d'Explorations Fonctionnelles Respiratoires du Centre Hospitalier Universitaire de Poitiers, et la détermination du seuil

ventilatoire ont été effectuée selon les modalités définies dans la partie théorique de ce mémoire. L'objectif de ce test triangulaire était de mesurer le $\dot{V}O_2$ max et de déterminer à la fois la PMA et le seuil ventilatoire de chaque sujet afin de sélectionner la population d'étude et de calculer la puissance mécanique de la session expérimentale.

La phase de familiarisation avec la tâche de TR consistait à réaliser 2 séries de 68 essais chacune. Après que l'expérimentateur ce soit assuré de la bonne compréhension des exigences de la tâche, la session expérimentale commençait.

Au cours de la session expérimentale, chaque sujet réalisait 2 blocs de 3 séries de 68 essais. Les 4 premiers essais de chaque série servaient systématiquement d'échauffement et étaient exclus du traitement des données. Le sujet effectuait un premier bloc au repos et un deuxième bloc à l'exercice. L'ordre de passation des deux conditions expérimentales était contrebalancé entre les différents sujets (Annexe 2). Une période de récupération était accordée au sujet à la fin du premier bloc jusqu'à ce que ses valeurs de fréquence cardiaque reviennent à des valeurs proches de celles enregistrées avant la tâche.

Dans la condition '*Repos*', la durée de passation d'un bloc d'essais (68 x 3 essais) était de 14 minutes et 30 secondes. Chaque série était réalisée en 4 minutes 30 secondes et l'expérimentateur avait 30 secondes entre chaque série afin de programmer la série suivante. La première série était réalisée à $t = 0$ minute, la seconde à $t = 5$ minutes et la troisième à $t = 10$ minutes. Dans la condition *Exercice*, la réalisation d'un échauffement préalable augmentait la durée de passation du bloc de 5 minutes. Le temps nécessaire à la réalisation d'un bloc d'essais, précédé de cette période d'échauffement, était généralement de 19 minutes et 30 secondes. La première série était réalisée à $t = 5$ minutes, la seconde à $t = 10$ minutes et la troisième à $t = 15$ minutes. Pendant la réalisation de la tâche, aucune information concernant la fréquence de pédalage, la fréquence cardiaque, ni aucune connaissance de résultat par rapport aux performances de TR n'était donnée au sujet.

L'activité EMG était enregistrée pour chaque essai tout au long de la tâche de TR. L'utilisation d'un oscilloscope permettait à l'expérimentateur de suivre la qualité des tracés EMG afin de limiter, dans la mesure du possible, l'enregistrement d'interférences. Lorsque le signal venait à se dégrader, l'expérimentateur demandait au sujet de se relâcher au maximum afin d'être le plus détendu possible entre les différents essais.

Le sujet effectuait également un test de détermination de fréquence critique de fusion avant et après la réalisation de la tâche simultanée. Six essais consécutifs étaient présentés en alternance, un essai était réalisé en phase ascendante et le suivant en phase descendante. Afin d'enregistrer les valeurs de fréquence critique de fusion immédiatement après l'exercice, le dispositif était placé sur une table roulante. Ainsi, le sujet effectuait ce test rapidement après l'exercice, sans descendre du vélo et sans gêne vis à vis de la présence des fils et des électrodes servant à l'enregistrement EMG.

TRAITEMENT DES DONNEES

Traitement des données électromyographiques

Le fractionnement du TR en deux composantes chronométriques (TPM et TM) a été obtenu après plusieurs étapes de traitement successives. Dans un premier temps, l'activité EMG enregistrée au cours de chaque essai était visualisée sur un écran d'ordinateur par l'intermédiaire du programme AffichePlus. Pour chaque essai, le début de l'activité musculaire volontaire du sujet était repéré visuellement à partir du tracé EMG et marqué manuellement par un curseur à l'aide d'une souris d'ordinateur (e.g., Burle *et al.*, 2002 ; Rihet, Possamaï, Micallef-Roll, Blin & Hasbroucq, 2002 ; Hasbroucq *et al.*, 2002). Le positionnement du marqueur sur le tracé indiquait automatiquement le TPM. Le TM était, quant à lui, calculé par soustraction. Lors du traitement des résultats, l'expérimentateur ne connaissait pas la nature de la condition expérimentale dont étaient issus les tracés EMG visualisés.

Seuls les essais ayant abouti à la production d'une réponse correcte et les essais 'pure-correct' étaient pris en considération dans le traitement des données EMG (pour des détails se référer à la Partie théorique – *Technique électromyographique et logiques d'inférence*). A l'issue du fractionnement du TR, nous avons également écarté les essais ayant une composante motrice anormalement élevée ($TM > 200$ ms).

Variables chronométriques et taux d'erreurs de décision

Lors du traitement des données, seuls les essais de TR ayant donné lieu à la production d'une réponse correcte ont été pris en considération. Lorsque le sujet fournissait une réponse incorrecte, la nature de l'erreur commise était enregistrée. Les TR enregistrés à la suite d'erreurs d'anticipation, d'erreurs d'omission ou d'erreurs de décision ont systématiquement été exclus des analyses. Contrairement aux deux expériences précédentes, les essais non réussis n'étaient pas représentés plus tard au cours de la série. En fonction de la quantité d'erreurs commises au cours de la série, le nombre d'essais de TR pris en considération n'était donc pas systématiquement le même d'un sujet à l'autre et d'une série à l'autre.

Le taux d'erreurs de décision a quant à lui fait l'objet d'un traitement à part en entière, afin de vérifier l'absence d'un changement de stratégie au niveau du compromis vitesse-précision entre les conditions repos et exercice. Le traitement statistique a été effectué à partir de la transformation arcsinus du taux d'erreurs (Winer, 1970).

Dans le cadre la logique chronométrique (reposant sur le fractionnement du TR en deux composantes chronométriques) seuls les essais pour lesquels les tracés EMG permettaient de déterminer les TPM et les TM pouvaient être exploités. Les essais pour lesquels les caractéristiques ou la qualité du tracé ne permettaient pas d'effectuer ce fractionnement, ont été écartés de l'analyse. La proportion d'essais rejetés *a posteriori* représentait 9% des essais de TR réussis.

Distributions de temps de réaction

Les données individuelles de TR, de TPM et de TM recueillies dans les conditions repos et exercice ont été vincentisées en 10 tranches d'essais. L'indice delta des trois composantes chronométriques a également été calculé d'après les données vincentisées pour les deux conditions expérimentales (pour des détails se référer à la partie théorique - *Analyse de distributions de temps de réaction*).

RESULTATS

STATISTIQUES

Le taux d'erreur de décision et les différentes variables chronométriques ont été analysés par l'intermédiaire d'analyse de variance (ANOVA). Un test de correction des degrés de libertés (Greenhouse-Geisser) a également été utilisé lorsqu'un facteur à mesures répétées comportait plus de deux modalités. Lors de l'obtention d'une interaction significative, une comparaison de moyennes a été effectuée par l'intermédiaire d'une analyse *a posteriori* de Newman-Keuls. Le seuil de signification pour l'ensemble des résultats a été fixé à une valeur alpha égale à .05.

FREQUENCE CARDIAQUE ET FREQUENCE DE PEDALAGE

La fréquence cardiaque (FC) et la fréquence de pédalage (FP) ont été analysées au cours de trois périodes de temps : entre la 6^{ème} et la 9^{ème} minute, entre la 11^{ème} et la 14^{ème} minute et entre la 16^{ème} et la 19^{ème} minute.

En ce qui concerne la fréquence cardiaque (FC), le plan d'expérience était composé de 2 facteurs à mesures répétées : le facteur période à trois modalités et le facteur intensité d'exercice à deux modalités (repos versus 50% PMA). Suite à des problèmes d'acquisition, les valeurs de FC d'un sujet, enregistrées pendant l'exercice, n'ont pu être exploitées. L'analyse statistique a donc été réalisée sur les données expérimentales de 11 sujets. Les résultats mettent en évidence un effet principal de l'intensité d'exercice ($F(1, 10) = 540.54$, $p < .05$) et une interaction entre l'intensité d'exercice et la période ($F(2, 20) = 14.52$, $p < .05$). En condition de repos, on observe une baisse de la FC entre la première et la dernière période de temps (6^{ème} à la 9^{ème} minute : $\underline{M} = 77$ bat.min⁻¹ versus 16^{ème} à la 19^{ème} minute : $\underline{M} = 73$ bat.min⁻¹). Dans la condition exercice, la FC augmente entre la première et la deuxième période de temps et passe de 137 bat.min⁻¹ à 142 bat.min⁻¹, puis elle se stabilise (16^{ème} à la 19^{ème} minute : $\underline{M} = 144$ bat.min⁻¹) (Figure 36).

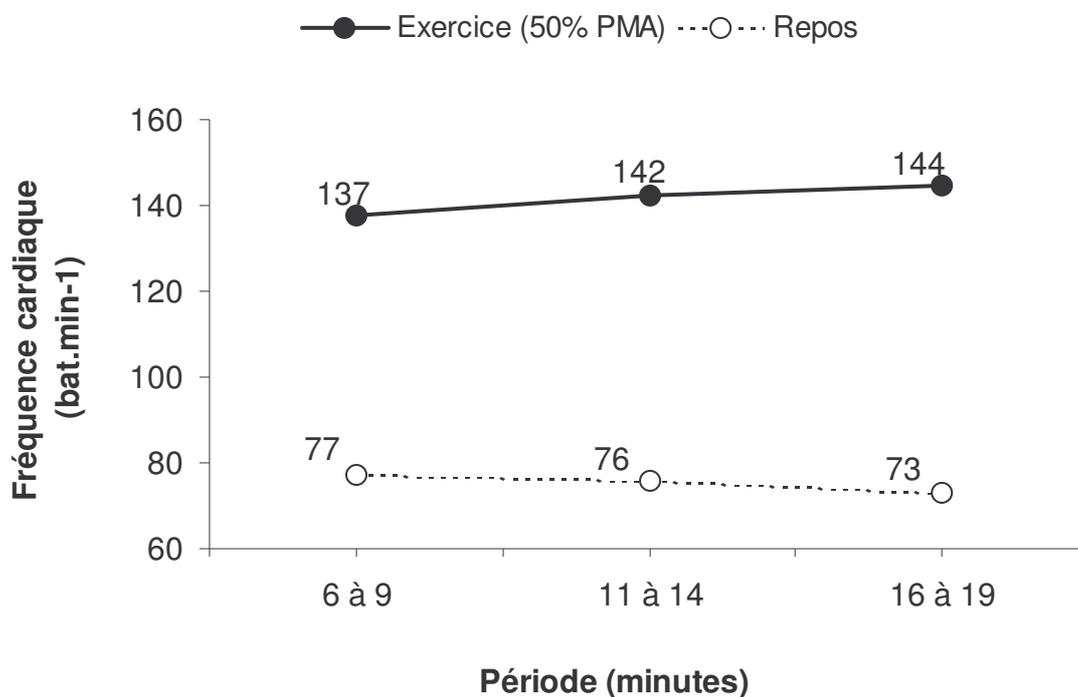


Figure 36. Evolution de la fréquence cardiaque (bat.min⁻¹) au cours de la tâche en fonction de l’intensité de l’exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Suite à des problèmes d’acquisition de données, l’analyse statistique des valeurs de fréquence de pédalage (FP) a été réalisée sur les données de 11 sujets. Le plan d’expérience était composé d’un facteur période à trois modalités. Les résultats mettent en évidence une augmentation constante de la FP au cours du bloc ($F(2, 20) = 16.01, p < .05$). La fréquence de pédalage passe de 72 tr.min⁻¹ entre la 6^{ème} et la 9^{ème} minute, à 75 tr.min⁻¹ entre la 11^{ème} et la 14^{ème} minute, pour atteindre 77 tr.min⁻¹ entre la 16^{ème} et la 19^{ème} minute.

EFFET DE L’EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION

Le plan d’expérience était composé d’un facteur à deux modalités (score avant l’exercice versus score après l’exercice). La comparaison des valeurs enregistrées avant ($\underline{M} = 33.01$ hertz) et après l’exercice ($\underline{M} = 34.45$ hertz) met en évidence une augmentation significative des valeurs de FCF ($F(1, 10) = 5.62, p < .05$).

Aucun effet significatif n'a été observé au niveau de l'écart entre les valeurs ascendantes et descendantes de FCF ($F(1, 10) = 0.10, p = .76$).

TAUX D'ERREURS DE DECISION

Le plan d'expérience de cette analyse était composé des deux facteurs à mesures répétées à deux modalités : le facteur intensité d'exercice (repos versus 50% PMA) et le facteur intensité du signal (intensité faible versus intensité forte)

Aucun effet de l'exercice ($F(1, 11) = 3.14, p = .10$; repos : $M = 0.09\%$ versus exercice : $M = 0.17\%$), ni aucun effet de l'intensité du signal ($F(1, 11) = 0.38, p = .55$; intensité faible : $M = 0.15\%$ versus intensité forte : $M = 0.11\%$) n'a été mis en évidence au niveau du taux d'erreurs de décision. Aucune interaction ne s'est avérée significative.

EFFET DE L'EXERCICE ET DE L'INTENSITE DU SIGNAL SUR LES DIFFERENTES VARIABLES CHRONOMETRIQUES

L'effet de l'exercice physique et de l'intensité du signal sur la moyenne du TR, du TPM et du TM ont été appréhendés à l'aide de trois analyses de variance distinctes. Trois autres analyses ont ensuite été réalisées sur la variance du TR, du TPM et du TM. Le plan d'expérience était composé des deux facteurs à mesures répétées à deux modalités : le facteur intensité d'exercice (repos versus 50% PMA) et le facteur intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Temps de réaction

Un effet principal de l'exercice ($F(1, 11) = 12.85, p < .05$) et de l'intensité du signal ($F(1, 11) = 276.54, p < .05$) ont été observés au niveau du TR, ainsi qu'une interaction sous-additive entre l'intensité de l'exercice et l'intensité du signal ($F(1, 11) = 7.73, p < .05$). La réalisation d'un exercice engendre une amélioration des performances de TR. De plus, l'amplitude de cet effet est plus importante pour un signal de forte intensité lumineuse ($M = -16$ msec) que pour un signal de faible intensité lumineuse ($M = -9$ msec) (Figure 37).

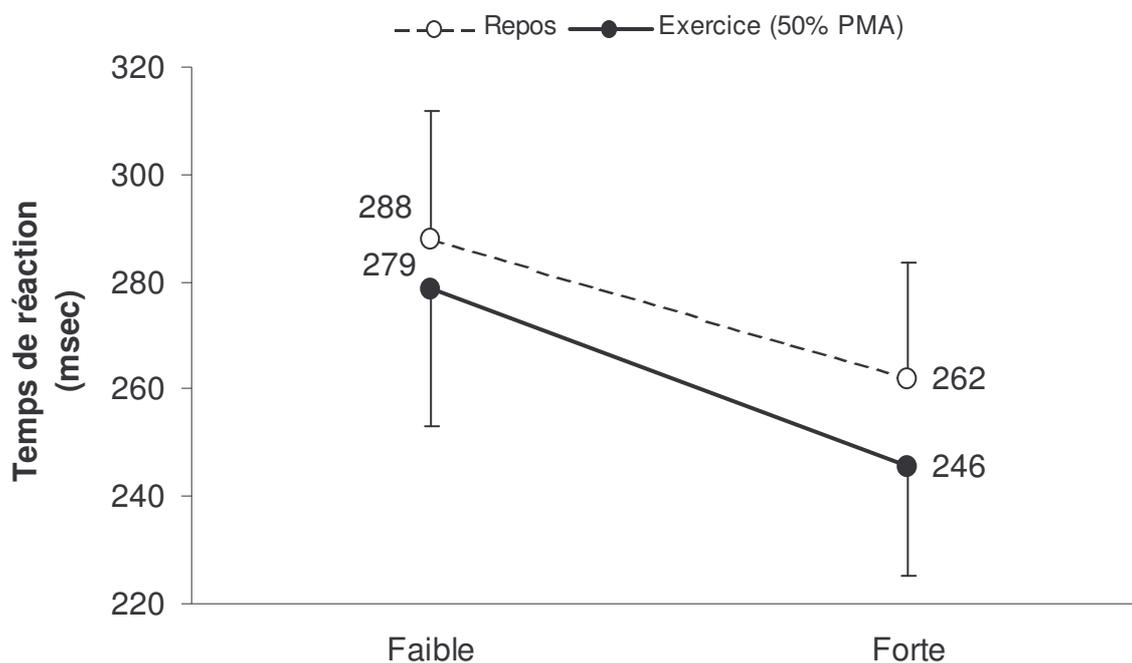


Figure 37. Temps de réaction (et écart-types) en fonction de l’intensité de l’exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-) et de l’intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Aucun effet de l’exercice, ni de l’intensité du signal et aucune interaction n’ont été observés au niveau de la variance du TR.

Temps Pré-moteur

Au niveau du TPM, un effet principal de l’intensité du signal ($F(1, 11) = 322.28, p < .05$) et une interaction sous-additive entre l’intensité de l’exercice et l’intensité du signal ($F(1, 11) = 12.45, p < .05$) ont été observés. Lorsque le signal est de faible intensité, aucun changement significatif n’apparaît au niveau du TPM, en revanche lorsque le signal est de forte intensité on observe une diminution du TPM à l’exercice ($M = -5 \text{ msec} ; p < .05$) (Figure 38).

Aucun effet de l’exercice, ni de l’intensité du signal et aucune interaction n’ont été observés au niveau de la variance du TPM.

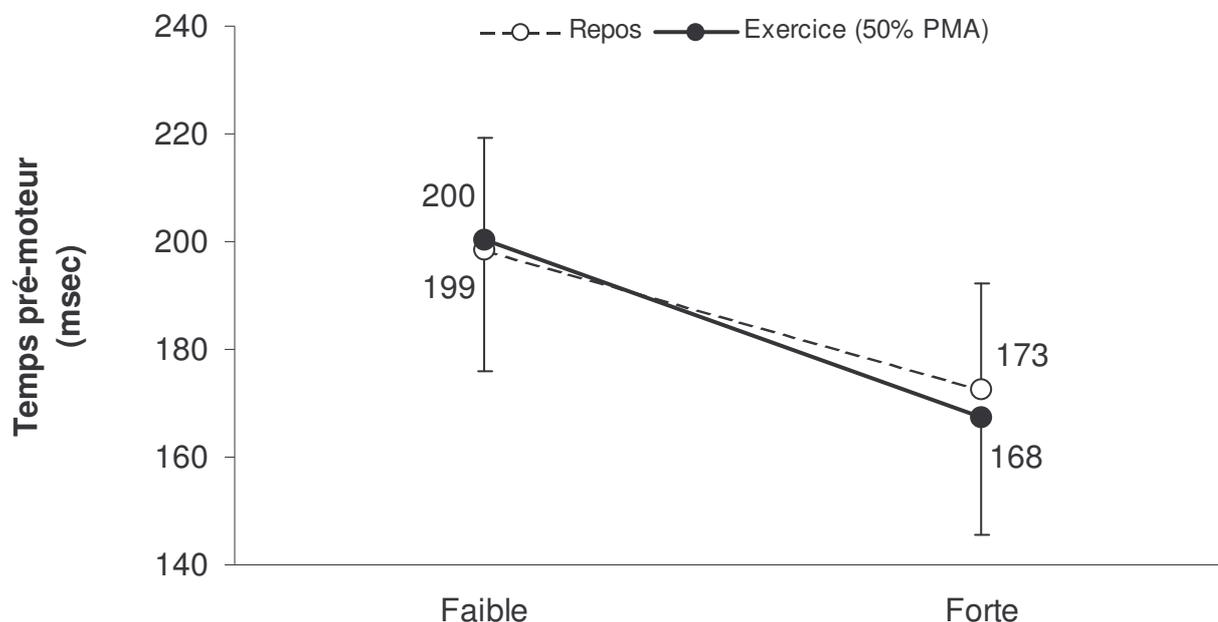


Figure 38. Temps pré-moteur (et écart-types) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Temps Moteur

Au cours de l'exercice, on observe une diminution du TM ($\underline{M} = 78$ msec) comparativement au repos ($\underline{M} = 89$ msec) ($F(1, 11) = 2.43, p < .05$) (Figure 39). L'effet de facilitation induit par l'exercice au niveau du TM est de 11 msec. Aucun autre effet, ni aucune interaction ne se sont avérés significatifs.

Aucun effet de l'exercice, ni de l'intensité du signal n'a été observé au niveau de la variance du TM. Aucune interaction ne s'est révélée significative.

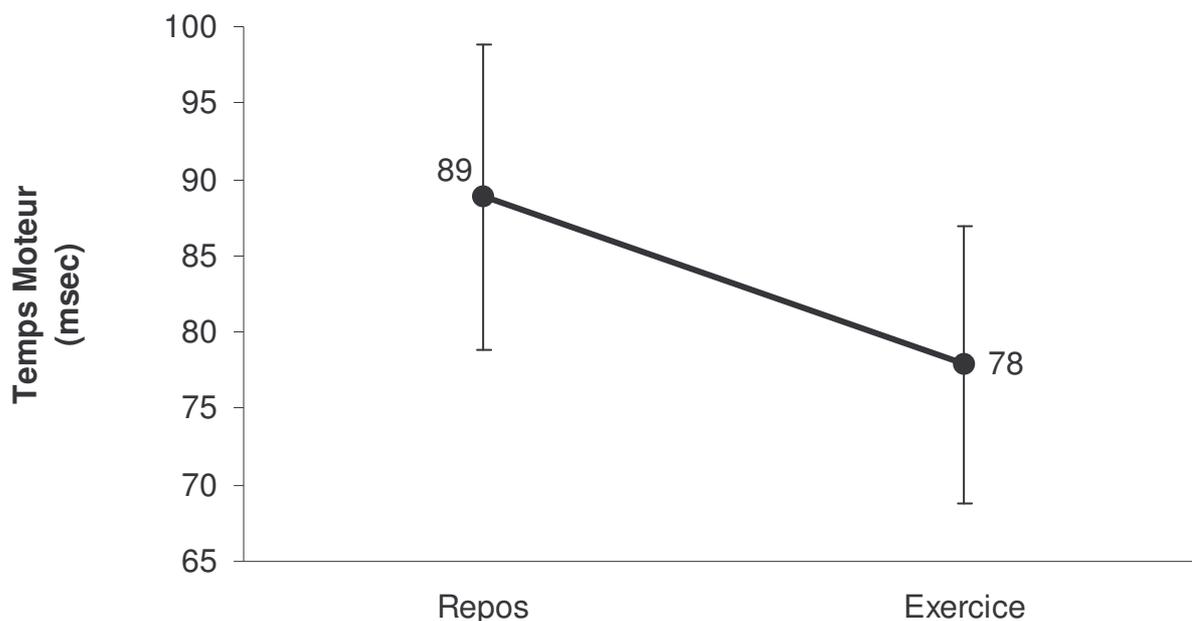


Figure 39. Temps moteur (et écart-types) en fonction de l’intensité de l’exercice (repos versus 50% PMA).

ANALYSE DES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION

L'effet de l'exercice physique sur les distributions de TR a été appréhendé par l'intermédiaire d'une série d'analyses de variance : une première analyse a été réalisée sur les valeurs de TR, une seconde sur les valeurs de TPM et une troisième sur les valeurs de TM. Les différents plans d'expérience étaient composés des deux facteurs à mesures répétées : le facteur intensité d'exercice à deux modalités (repos versus 50% PMA) et le facteur décile à dix modalités (10 tranches d'essais issus de la vincentisation).

Temps de réaction

Au niveau du TR, l'analyse révèle un effet principal de l'exercice ($F(1, 11) = 12.04, p < .05$) et un effet trivial du facteur décile ($F(9, 99) = 513.68, p < .05$). L'interaction entre ces deux facteurs n'est pas significative ($F(9, 99) = 0.70, p = .71$). L'exercice provoque un décalage de l'ensemble de la distribution de TR vers la gauche, sans modifier la forme de la courbe (Figure 40). On remarque que l'exercice physique affecte aussi bien les TR courts que les TR longs et l'indice Delta montre que cet effet est de même amplitude pour l'ensemble des TR (10-16 ms) (encadré figurant à l'intérieur de la Figure 40).

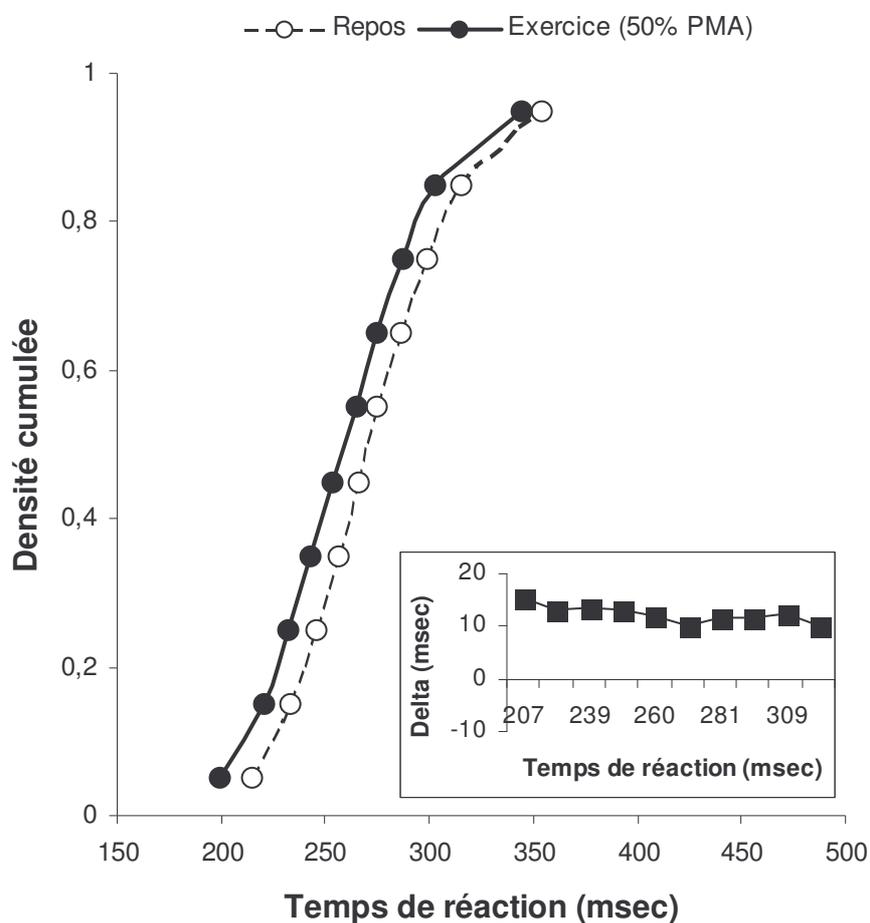


Figure 40. Distribution des Temps de réaction et indice Delta (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Temps Pré-Moteur

En ce qui concerne le TPM, l'analyse révèle uniquement un effet significatif du facteur décile ($F(9, 99) = 438.99, p < .05$). L'effet principal de l'exercice ($F(1, 11) = 0.29, p = .60$) et l'interaction entre les facteurs intensité de l'exercice et décile ne sont pas significatifs au niveau du TPM ($F(9, 99) = 1.24, p = .28$). L'exercice ne modifie pas la distribution de cette composante temporelle (Figure 41). Aucun effet notable n'est observé que ce soit au niveau des TPM longs ou des TPM courts (encadré figurant à l'intérieur de la Figure 41).

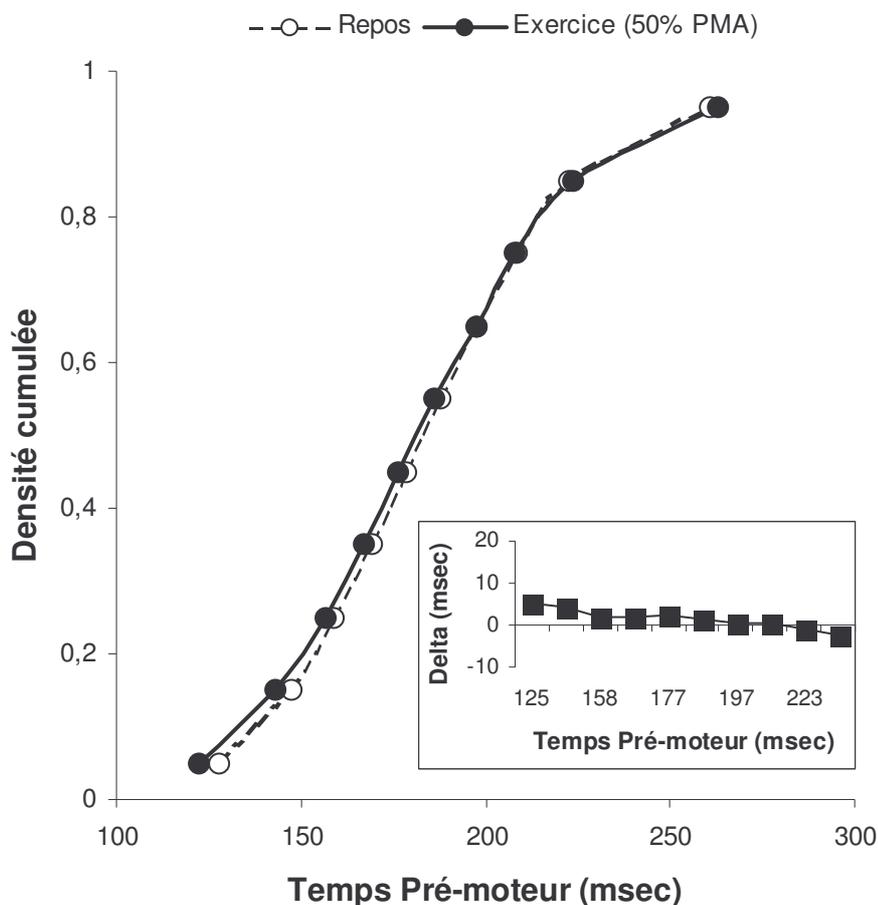


Figure 41. Distribution des Temps Pré-moteur et indice Delta (msec) en fonction de l’intensité de l’exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Temps Moteur

Au niveau du TM, l’analyse statistique révèle un effet principal de l’exercice ($F(1, 11) = 6.28, p < .05$) et un effet trivial du facteur décile ($F(9, 99) = 269.03, p < .05$). L’interaction entre les facteurs intensité de l’exercice et décile n’est pas significative ($F(9, 99) = 0.16, p = 1$). L’exercice provoque un décalage de l’ensemble de la distribution des temps moteurs vers la gauche (Figure 42). La forme de la courbe reste inchangée, la réalisation d’un exercice physique affecte l’ensemble des TM. L’indice Delta (encadré figurant à l’intérieur de la Figure 42) montre que l’amplitude de l’effet de facilitation induit par l’exercice est identique pour l’ensemble des TM (9-12 ms).

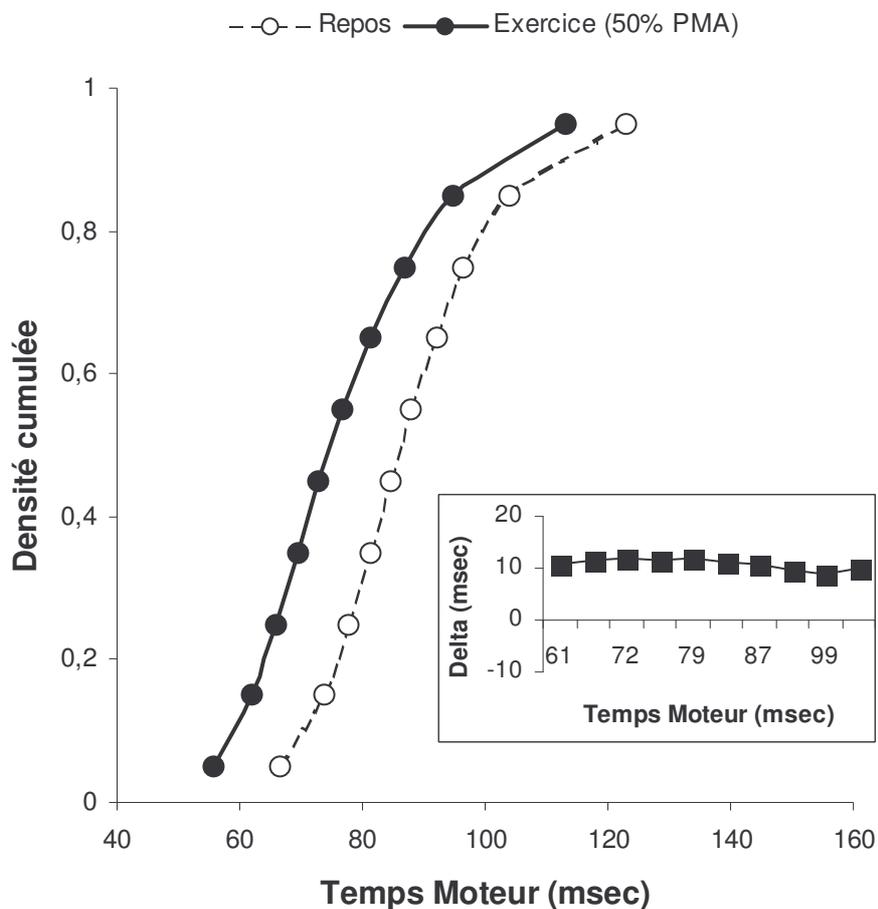


Figure 42. Distribution des Temps Moteur et indice Delta (msec) en fonction de l’intensité de l’exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

EFFET DE L’EXERCICE SUR LA FORME DU SIGNAL ELECTROMYOGRAPHIQUE

L’analyse de la forme de la bouffée EMG en fonction des différentes conditions expérimentales a été appréhendée, d’une part, par l’intermédiaire d’une analyse de la pente ascendante des tracés EMG rectifiés et, d’autre part, par la détermination de la surface sous les courbes EMG rectifiées.

Le traitement des résultats a été effectué sur les données enregistrées dans une fenêtre de temps allant de 0 à 80 msec. La largeur de cette fenêtre a été déterminée objectivement par rapport au TM moyen toutes conditions confondues (\underline{M} = 83 msec). On considère que la

première partie de cette fenêtre de temps (0 à 40 msec) indexe la partie ascendante de la courbe et que la deuxième partie (40 à 80 msec) reflète la partie descendante (Figure 43).

Le plan d'expérience de ces deux analyses statistiques était composé de deux facteurs à deux modalités : le facteur intensité d'exercice (repos versus 50% PMA) et le facteur intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Pente ascendante des tracés électromyographiques

Les résultats révèlent un effet de la manipulation de l'intensité de l'exercice sur la pente ascendante de la bouffée EMG ($F(1, 11) = 7.94, p < .05$). Le coefficient de la pente du tracé EMG à l'exercice ($M = 4.51$) est supérieur à celui observé au repos ($M = 3.04$) (Figure 43). La manipulation de l'intensité du signal impératif de réponse n'a aucune conséquence notable sur la pente de la courbe EMG ($F(1, 11) = 0.25, p = .63$). L'interaction entre l'exercice et l'intensité du signal n'est pas significative ($F(1, 11) = 4.05, p = .07$).

Surface sous les tracés électromyographiques

L'analyse de la surface totale située sous la courbe EMG (fenêtre 0 à 80 msec), en fonction des différentes conditions expérimentales, révèle un effet marginal de l'intensité de l'exercice ($F(1, 11) = 3.67, p = .08$). Aucun autre effet, ni aucune interaction ne s'approche du seuil de significativité statistique.

Une analyse plus précise a donc été réalisée au niveau des deux fenêtres de temps indexant respectivement la partie ascendante (fenêtre 0 à 40 msec) et la partie descendante de la courbe (fenêtre 40 à 80 msec). Il s'avère que la surface sous la partie ascendante de la courbe EMG est plus importante à l'exercice qu'au repos ($F(1, 11) = 8.27, p < .05$), en revanche aucune différence notable n'a été observée au niveau de la partie descendante de la courbe ($F(1, 11) = 1.04, p = .33$) (Figure 43). Aucun effet de l'intensité du signal n'a été observé au niveau de la phase ascendante ($F(1, 11) = 0.25, p = .63$), ni au niveau de la phase descendante de la courbe ($F(1, 11) = 2.90, p = .12$). Aucune interaction ne s'est révélée significative.

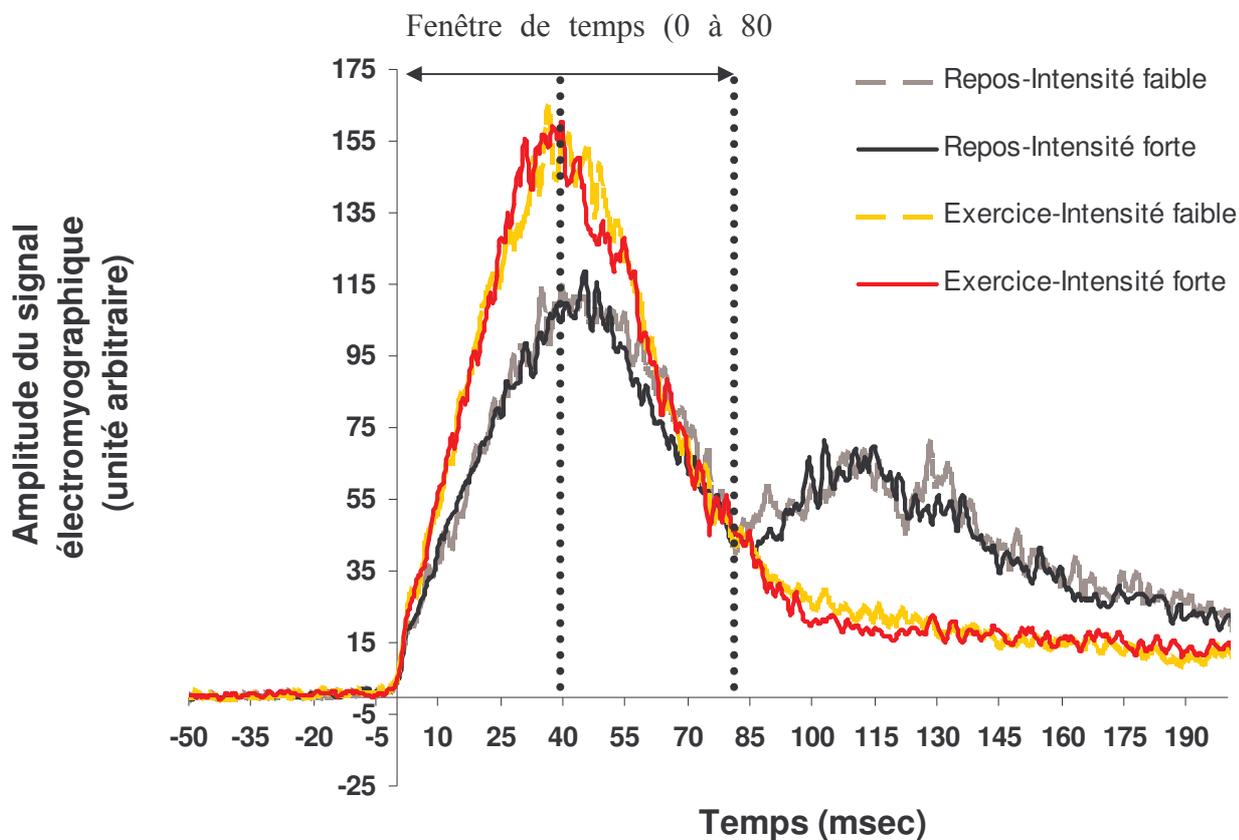


Figure 43. Représentation graphique des grands moyennages des courbes électromyographiques redressées (non lissées) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos versus 50% PMA) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

DISCUSSION

Ce protocole expérimental a été mis en place afin de localiser l'effet de facilitation des performances cognitives induit par la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale modérée. Le cadre d'inférence de ce travail repose, d'une part, sur la logique chronométrique et, d'autre part, sur la méthode des facteurs additifs de Sternberg (1969). Le début de l'activité EMG du muscle agoniste impliqué dans la réponse a été utilisé pour fractionner le TR en deux composantes chronométriques, reflétant chacune des processus cognitifs distincts : le TPM et le TM. De plus, l'intensité du signal, connue pour affecter le

stade de pré-traitement du stimulus, a été manipulée afin de tester l'influence sélective de l'exercice au niveau des processus périphériques sensoriels.

L'objectif de cette étude était également de vérifier un certain nombre de résultats, à savoir : une augmentation de la fréquence critique de fusion (Expérience 1) et un décalage de l'ensemble de la distribution de TR (Expérience 2) lors de la réalisation d'un exercice physique.

Au cours de cette étude, les sujets étaient invités à effectuer une tâche de TRC au repos et pendant une tâche de pédalage réalisée à une intensité correspondant à 50% de leur puissance maximale aérobie.

EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE

Au cours de l'exercice, les résultats concernant l'évolution des valeurs de fréquence cardiaque et de fréquence de pédalage répliquent ceux précédemment observés dans le cadre de ce mémoire, à savoir : une augmentation de la fréquence cardiaque due à la mise en place de mécanismes de thermorégulation et à la libération concomitante de noradrénaline, ainsi qu'une augmentation de la fréquence de pédalage résultant d'une adaptation spontanée du sujet en fonction de la durée de l'épreuve.

EFFETS DE L'EXERCICE SUR LA FREQUENCE CRITIQUE DE FUSION

L'augmentation des valeurs de fréquence critique de fusion avec l'exercice confirme clairement une augmentation du niveau d'éveil cortical des sujets immédiatement après la réalisation d'un exercice physique modéré. L'absence d'effet, au niveau de l'écart entre les valeurs ascendantes et descendantes, laisse penser que la stratégie de discrimination du signal est identique au cours des différentes sessions.

L'augmentation moyenne des valeurs de fréquence critique de fusion reste relativement faible ($\underline{M} = 1.44$ hertz) et l'utilisation d'une fréquence d'incrément de faible amplitude (1 hertz/sec) semble essentielle à la mise en évidence de cette augmentation de la fréquence critique de fusion avec l'exercice.

EFFETS DE L'INTENSITE DU SIGNAL

Conformément aux résultats de la littérature, la manipulation de l'intensité du signal affecte les performances de TR (Nissen, 1977). Le TR est plus court lorsque le signal visuel est de forte intensité. De plus, cette amélioration des performances ne se fait pas au détriment de la précision de la réponse. Enfin, la manipulation de ce facteur n'a aucun effet sur la variance du TR.

Au niveau du temps réaction fractionné, les résultats obtenus répliquent ceux de Rihet *et al.* (1999) ayant observé un effet de l'intensité du signal au niveau du TPM. En effet, l'intensité du signal affecte uniquement la composante pré-motrice et n'a aucun effet sur la composante motrice du TR. D'une modalité à l'autre, l'effet de l'intensité du signal a une amplitude 30 msec au niveau du TR. Le fractionnement du TR montre que la totalité de cet effet apparaît au niveau du TPM ($\Delta = 29.4$ msec), en revanche le TM reste inchangé ($\Delta = 0.2$ msec).

Ces résultats sont conformes aux attentes des auteurs, la manipulation de l'intensité du signal, connue pour influencer les processus de pré-traitement de l'information, affecte bien la composante pré-motrice du TR que l'on considère classiquement comme indexant les étapes sensorielles et centrales du traitement de l'information.

EFFETS DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION

En accord avec les résultats d'études antérieures, la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale modérée induit un effet de facilitation des performances cognitives. Cet effet est non seulement notable au niveau du TR ($\underline{M} = 13$ msec), mais également au niveau du TM ($\underline{M} = 11$ msec). L'effet de facilitation semble essentiellement dû à une diminution de l'intervalle de temps séparant l'apparition de l'activité EMG du déclenchement de la réponse motrice. De plus, contrairement aux résultats d'Arcelin *et al.* (1998) et conformément aux résultats de la deuxième expérience présentée dans ce mémoire, l'exercice physique provoque un décalage de l'ensemble de la distribution de TR vers la gauche. Le même pattern de résultats est également observé sur la distribution de TM. Ces résultats suggèrent, d'une part, que l'exercice physique affecte essentiellement les étapes périphériques motrices de traitement et, d'autre part, que l'amplitude de l'effet est la même pour tous les essais de TR. Le fait que l'intensité de l'exercice affecte des étapes de traitement situées après

le changement d'activité EMG, laisse penser que la vitesse de la contraction musculaire et/ou une partie des étapes de programmation motrice, d'ajustement moteur et d'exécution motrice est/sont affectée(s).

Malgré l'absence d'effet significatif de l'exercice sur la composante pré-motrice ($\Delta = 2$ msec), la mise en évidence d'une interaction entre l'intensité du signal et l'exercice physique plaide en faveur d'un effet de facilitation, de faible amplitude, localisé au niveau des étapes sensorielles de traitement. En effet, d'après la logique des facteurs additifs, ce pattern d'interaction observé à la fois au niveau du TR et du TPM suggère que l'exercice affecte les étapes sensorielles de traitement. L'interaction observée au cours de cette étude est de type sous-additive car l'effet combiné de la manipulation de deux facteurs est inférieure à la somme des effets de la manipulation séparée des deux facteurs. En effet, contrairement aux résultats attendus, l'effet de l'exercice est plus important lorsque le signal est de forte intensité lumineuse. Cette observation, nous amènent donc à penser que l'exercice physique et l'intensité du signal affectent un même stade sensoriel traitement, par contre ces deux facteurs semblent influencer des processus distincts opérant en parallèle. Par ailleurs, l'influence de l'exercice sur les processus sensoriels, suggérée par l'observation de ce patron d'interaction, est tout à fait compatible avec l'augmentation des valeurs de fréquence critique de fusion observée immédiatement après l'exercice.

ANALYSE DE LA FORME DU TRACE ELECTROMYOGRAPHIQUE

L'analyse de la forme de la bouffée EMG en fonction de la manipulation de l'intensité de l'exercice a été effectuée afin de préciser l'effet de facilitation observé au niveau du TM.

Tout d'abord, il semble important de commenter l'apparition d'une deuxième activité EMG tardive entre 90 msec et 160 msec. *A posteriori*, cette activité musculaire parasite semble liée au positionnement des électrodes sur le muscle fléchisseur du pouce. En effet, étant donné la configuration anatomique de ce muscle, les électrodes peuvent aussi bien enregistrer une activité EMG lors d'un mouvement de flexion que lors d'un mouvement d'extension. Au cours du protocole expérimental, il semblerait que certains sujets aient terminé leur mouvement d'appui par un mouvement bref de retrait du pouce. Ce comportement (non observé à l'exercice) ne présente pas de réel intérêt mais ne gêne en rien l'interprétation des résultats.

En revanche, l'augmentation de la raideur de la pente du tracé EMG, d'une part, et de la surface sous la partie ascendante de la courbe, d'autre part, témoignent d'une augmentation de la vitesse de recrutement des motoneurones pendant l'exercice. En effet, si on considère que le même nombre d'unités motrices est recruté, au niveau du muscle du pouce entre les conditions repos et exercice, une meilleure synchronisation de la décharge des motoneurones pourrait expliquer l'observation d'un raccourcissement du TM (Meijers *et al.*, 1976). Ces résultats apportent un argument en faveur d'une meilleure synchronisation de la décharge des motoneurones et d'une plus grande efficacité de la commande cortico-spinale pendant l'exercice (Hasbroucq *et al.*, 1995 ; Possamaï *et al.*, 2002).

En résumé, les résultats de cette étude confirment l'apparition d'un phénomène de facilitation des performances de TRC, induit par la réalisation d'un exercice physique (50% de PMA). De plus, l'augmentation des valeurs de fréquence critique de fusion confirme l'hypothèse d'une élévation du niveau d'éveil cortical des sujets immédiatement après l'exercice. Le fractionnement du TR utilisé conjointement à la logique des facteurs additifs, apporte des arguments en faveur d'une localisation de l'effet de facilitation, induit par l'exercice, au niveau des processus périphériques moteurs ainsi qu'au niveau des processus sensoriels de traitement de l'information.

L'amélioration du TR semble essentiellement due à une diminution du TM, ce qui montre que l'exercice affecte principalement la durée des étapes motrices de traitement. Ce résultat est relativement contradictoire avec l'absence d'interaction entre l'exercice et la durée de la période préparatoire observé lors de la première expérience de ce mémoire. Les réserves émises vis-à-vis de l'interprétation des patrons d'additivité de cette première expérience sont donc confirmées.

Les données EMG suggèrent, quant à elles, une meilleure synchronisation de la décharge des motoneurones et une plus grande efficacité de la commande cortico-spinale. Par ailleurs, l'exercice physique interagit avec l'intensité du signal. Cette observation montre que l'exercice agit également au niveau des processus sensoriels de traitement, mais à un moindre degré. Etant donné que la rétine possède des neurones ganglionnaires dopaminergiques, la libération de dopamine au cours de l'exercice pourrait expliquer cet effet d'interaction.

L'ensemble des résultats de cette étude est tout à fait compatible avec l'hypothèse d'une amélioration des performances cognitives induite par l'augmentation du niveau d'activation médiée par une libération de catécholamines. En effet, l'augmentation des valeurs de fréquence critique de fusion confirme, d'une part, l'hypothèse d'une élévation du niveau d'éveil cortical des sujets immédiatement après l'exercice. D'autre part, l'interaction avec l'intensité du signal pourrait être liée à la libération de catécholamines pendant l'exercice (dopamine).

**LOCALISATION DE L'EFFET D'UN EXERCICE AU COURS D'UNE
TACHE DE TEMPS DE REACTION SIMPLE : UNE ETUDE
ELECTROMYOGRAPHIQUE**

INTRODUCTION

L'influence de l'exercice physique a largement été étudiée au cours de nombreuses tâches cognitives, mais la diversité des protocoles expérimentaux a longtemps conduit à l'obtention de résultats contradictoires. La mise en place de protocoles standardisés et rigoureux apparaît comme un élément déterminant dans l'étude de l'effet de facilitation des performances cognitives, induit par la réalisation d'un exercice physique. Comme nous l'avons vu précédemment (Partie théorique – *Effet de facilitation induit par un exercice sous maximal*), on considère que les caractéristiques de la tâche cognitive sont susceptibles de modifier le sens ou l'amplitude de l'effet de l'exercice (Brisswalter *et al.*, 1997 ; Isaacs & Polhman, 1991 ; McMorris & Keen, 1994). Contrairement aux résultats observés lors de la réalisation de tâches complexes, une dégradation des performances est généralement mise en évidence au cours de tâches simples. A notre connaissance, aucune étude ne fait état d'une amélioration des performances lors de la réalisation d'une tâche de TRS au cours d'un exercice de pédalage d'intensité sous-maximale. En effet, rappelons que seules deux études ont observé une amélioration des performances cognitives au cours d'une tâche de TRS (Travlos *et al.*, 1992 cités par Collardeau, 2001; Collardeau *et al.*, 2001). Travlos *et al.* (1992) ont mis en évidence une diminution du TR immédiatement après la réalisation d'un exercice triangulaire d'intensité maximale, et Collardeau *et al.* (2001) ont observé une amélioration des performances de TRS au cours d'un exercice de course sur tapis roulant. En dehors de ces deux études, les auteurs rapportent systématiquement une dégradation ou une absence d'effet de l'exercice sur les performances cognitives lorsque les sujets sont invités à réaliser une

tâche de TRS (Mc Morris & Keen, 1994 ; Brisswalter *et al.*, 1995 ; Brisswalter *et al.*, 1997 ; Delignières *et al.*, 1993 ; Mc Morris & Keen, 1994).

Cette dégradation est expliquée, par certains auteurs, comme résultant d'un effet de double tâche particulièrement important lors de tâche de TRS (Delignières *et al.*, 1993) et lors de tâches physiques où le sujet est contraint à maintenir une fréquence de pédalage imposée (Brisswalter *et al.*, 1995). De plus, l'absence d'effet semble également liée à la faible quantité de ressources allouées, ainsi qu'au peu d'investissement des sujets investi au cours de ce type de protocole présentant une difficulté subjective relativement faible (Brisswalter *et al.*, 1997 ; Isaacs & Polhman, 1991 ; McMorris & Keen, 1994). Enfin, la disparité des résultats entre les tâches de TRC et de TRS laissent supposer que la nature des processus de traitement mis en œuvre et notamment l'incertitude événementielle de la tâche pourraient expliquer la disparité des résultats. Il a effectivement été suggéré que les performances de TR de choix s'améliorent au cours de l'exercice car se sont les étapes centrales de traitement qui sont affectées. Le fait que ces étapes centrales ne soient pas présentes dans une tâche de TR simple pourrait alors expliquer la différence de résultats observée entre les deux types de tâche. Cependant, cette hypothèse est d'une part invalidée par les résultats de l'expérience 3 ayant mis en évidence un effet de l'exercice au niveau des processus périphériques (perceptifs et moteurs). D'autre part, il ne semble pas réellement pertinent de considérer que la différence entre les TR moyens enregistrés respectivement dans les tâches de TRC et de TRS représente la somme des durées des opérations d'identification du signal et de sélection de la réponse appropriée.

En effet, cette dernière hypothèse reviendrait à appliquer la méthode soustractive de Donders (1868), or un certain nombre de critiques a été formulé à l'encontre de cette méthode (e.g., Külpe, 1895). Tout d'abord, rappelons que le postulat d'un processus de réaction purement sériel dans lequel les durées des différentes opérations mentales s'additionneraient purement et simplement n'a toujours pas été établi clairement. Ensuite, il est important de noter qu'au cours de la réalisation d'une tâche de TRS le sujet est parfois amené à anticiper l'occurrence du signal de réponse, c'est à dire à ne pas attendre de l'avoir complètement identifié avant de déclencher la réponse. La mise en place de cette stratégie rend la méthode soustractive peu fiable, étant donné qu'au cours de certains essais, les TR enregistrés n'incluent pas la durée de l'opération d'identification du stimulus. Enfin, de sérieux doutes ont été émis vis-à-vis de la possibilité d'ajouter une opération mentale sans affecter la durée des autres opérations mentales (postulat de la pure insertion). En effet, une tâche de TRC est

certainement autre chose qu'une simple tâche de TRS complétée des opérations d'identification et de sélection dans la mesure où l'état préparatoire du sujet est qualitativement différent dans les deux tâches. En effet, au cours d'une tâche de TR simple, le sujet n'a aucune incertitude quant à la nature du stimulus qui va lui être présenté et à la réponse qu'il devra produire. Il s'agit donc pour le sujet d'effectuer une simple synchronisation entre l'apparition du signal de réponse et le déclenchement de sa réponse motrice (Courtière *et al.*, 2000). La seule décision qu'il aura à prendre sera de décider de répondre au stimulus présenté ou de ne pas répondre dans le cas où des essais pièges pourraient lui être présentés. En revanche, le traitement de l'information lors d'une tâche de TRC nécessite l'extraction des caractéristiques du signal, la sélection, la programmation et l'exécution de la réponse appropriée. Il semblerait donc que les étapes centrales de traitement soient plus ou moins complexes, d'une tâche à l'autre, par ailleurs rien ne permet d'affirmer que les étapes périphériques sont absolument identiques.

Les résultats de l'expérience précédente suggèrent que l'amélioration des performances de TR est essentiellement due à une diminution de la durée des étapes motrices. A un moindre degré, cet effet de facilitation s'expliquerait également par une diminution de la durée des étapes sensorielles de traitement de l'information. Si l'on considère d'une part, que l'exercice affecte des processus de traitements périphériques sensoriels et moteurs (expérience 3) et, d'autre part, que ces étapes périphériques sont présentes lors de la réalisation d'une tâche de TRS ; l'effet de facilitation observé lors de la réalisation d'une tâche de TRC devrait également être observé lors de la réalisation d'une tâche de TRS.

Ce protocole expérimental a été mis en place afin de vérifier, d'une part, la possibilité d'observer un effet de facilitation induit par un exercice physique lors de la réalisation d'une tâche cognitive simple et de confirmer, d'autre part, la localisation de cet effet au niveau des processus périphériques sensoriels et moteurs. Le cadre d'inférence de ce travail est similaire à celui de l'expérience 3, il repose à la fois sur la logique chronométrique et sur la méthode des facteurs additifs (manipulation de l'intensité du signal). Le déroulement du protocole expérimental et la manipulation de l'intensité de l'exercice sont strictement les mêmes. La seule différence concerne la nature de la tâche cognitive qui s'avère être une tâche de TRS dans cette expérience 4.

Au cours de cette étude, toutes choses étant égales part ailleurs, à l'exception de la complexité de la tâche cognitive, nous nous attendons à reproduire à l'identique l'ensemble des résultats observés dans l'expérience 3, à savoir : 1) une évolution du TR inversement proportionnelle à l'intensité du signal lumineux (Nissen, 1977), 2) un effet de la manipulation de l'intensité du signal sur le TPM et 3) une absence d'effet sur le TM (Rihet *et al.*, 1999). Concernant la manipulation de l'intensité d'exercice, nous nous attendons également à observer : 1) une diminution du TR pendant l'exercice comparativement au repos, 2) une interaction sous-additive entre l'intensité du signal et l'exercice, 3) un décalage de l'ensemble de la distribution de TR et de la distribution de TM vers la gauche et 4) une augmentation de la pente ascendante du tracé EMG rectifié pendant l'exercice.

METHODE

SUJETS

Au cours de cette expérience, 6 filles et 6 garçons ont été sélectionnés selon les mêmes critères que ceux retenus pour l'expérience précédente. La valeur moyenne de $\dot{V}O_2\text{max}$ était respectivement de $38 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ (± 5) pour les filles et de $48 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ (± 5) pour les garçons. La PMA moyenne était respectivement de 213 watts (± 21) pour les filles et de 325 watts (± 32) pour les garçons. Le seuil ventilatoire des sujets a été estimé à une puissance de 113 watts (± 14) pour les filles et de 171 watts (± 19) pour les garçons (Annexe 1).

TACHES ET APPAREILLAGE

Tâche de temps de réaction simple

Dans cette expérience, la tâche cognitive était une tâche de TRS. L'objectif était de répondre, le plus rapidement et le plus précisément possible, par une pression du pouce de la main droite dès l'apparition du signal impératif de réponse.

Le sujet était installé sur une bicyclette ergométrique, les avant-bras posés sur un support recouvert de mousse. Une planche de bois noire, dans laquelle étaient incrustées 2 diodes lumineuses, était placée face au sujet à une distance de 60 cm. Une diode verte, située au centre du dispositif, servait de point de fixation centrale. Une diode rouge située, à 7,5 cm à la droite de la diode centrale, servait de signal impératif de réponse. La hauteur de la planche était systématiquement ajustée afin d'aligner la ligne horizontale formée par les 2 diodes avec le regard du sujet. La poignée droite du guidon de vélo, équipée d'un bouton poussoir, permettait aux sujets de fournir leur réponse par une pression du pouce (750 grammes).

Chaque essai débutait par une période préparatoire fixe d'une durée de 500 ms précédant le signal impératif de réponse. Cette période préparatoire commençait avec l'apparition d'un signal préparatoire visuel d'une durée de 50 ms, ce signal correspondait à l'allumage de la diode centrale. Une fois la diode centrale éteinte et la période préparatoire écoulée, le signal de réponse était présenté au sujet. Dans 20% des cas, le signal préparatoire n'était suivi d'aucun signal impératif de réponse. La période préparatoire étant fixe, ces essais pièges ont été mis en place afin d'éviter au sujet d'adopter une stratégie d'anticipation. Le signal impératif de réponse restait allumé jusqu'à ce qu'une réponse soit donnée par le sujet. Au-delà de 700 ms, si aucune réponse n'était enregistrée l'essai était considéré comme une erreur d'omission. L'intervalle inter-essais correspondait à une durée de 200 ms.

La rapidité et la précision de la réponse étaient enregistrées à chaque essai. Trois types d'erreurs étaient enregistrés : les erreurs d'anticipation ($TR < 130$ ms), les erreurs d'omission ($TR > 700$ ms) et les réponses aux essais pièges. L'intensité lumineuse du signal impératif de réponse était variable et manipulée de façon aléatoire à l'intérieur des blocs d'essais. Pour un bloc d'essais donné, la moitié des essais correspondait à un signal de faible intensité lumineuse et l'autre moitié à un signal de forte intensité lumineuse.

Epreuve de double tâche et mesures électromyographiques

L'épreuve de double tâche et l'acquisition des données électromyographiques étant les mêmes que celles décrites dans la précédente expérience, nous ne reviendrons pas en détails sur ces points méthodologiques. Au cours de cette expérience de TRS, les électrodes de

surface étaient uniquement placées sur le court fléchisseur du pouce de la main droite servant à la production de la réponse.

PROCEDURE ET TRAITEMENT DES DONNEES

La procédure et le traitement des résultats étaient également similaires à ceux de l'expérience 3, à la seule différence que les sujets n'effectuaient pas de test de détermination de fréquence critique de fusion.

Au cours de cette expérience, les données électromyographiques d'un sujet n'ont pu être prises en considération à cause de la mauvaise qualité des tracés EMG enregistrés. Si l'on considère l'ensemble des sujets, la proportion d'essais rejetés *a posteriori* représentait 12% des essais de TR réussis.

RESULTATS

STATISTIQUES

Le taux d'erreurs et les différentes variables chronométriques ont été analysés par l'intermédiaire d'analyse de variance (ANOVA) associées à un test de correction des degrés de libertés (Greenhouse-Geisser) lorsqu'un facteur à mesures répétées comportait plus de deux modalités. Lors de l'obtention d'une interaction significative, une comparaison de moyennes a été effectuée par l'intermédiaire d'une analyse *a posteriori* de Newman-Keuls. Le seuil de signification pour l'ensemble des résultats a été fixé à une valeur alpha égale à .05.

FREQUENCE CARDIAQUE ET FREQUENCE DE PEDALAGE

La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage ont été analysées au cours de trois périodes de temps : entre la 6^{ème} et la 9^{ème} minute, entre la 11^{ème} et la 14^{ème} minute et entre la 16^{ème} et la 19^{ème} minute.

En ce qui concerne la fréquence cardiaque (FC), le plan d'expérience était composé de 2 facteurs à mesures répétées : le facteur période à trois modalités et le facteur intensité d'exercice à deux modalités (repos versus 50% PMA). Suite à des problèmes d'acquisition, les données d'un sujet enregistrées pendant l'exercice n'ont pu être exploitées. L'analyse statistique a donc été réalisée sur les données expérimentales de 11 sujets. Les résultats mettent en évidence un effet principal de l'intensité d'exercice ($F(1, 10) = 247.89, p < .05$) et une interaction entre l'intensité d'exercice et la période ($F(2, 20) = 15.09, p < .05$). En condition de repos, on observe une baisse de la FC entre la première et la dernière période de temps (6^{ème} à la 9^{ème} minute : $\underline{M} = 77 \text{ bat.min}^{-1}$ versus 16^{ème} à la 19^{ème} minute : $\underline{M} = 74 \text{ bat.min}^{-1}$). Dans la condition exercice, la FC augmente entre la première et la deuxième période de temps et passe de 132 bat.min^{-1} à 139 bat.min^{-1} , puis elle se stabilise (16^{ème} à la 19^{ème} minute : $\underline{M} = 141 \text{ bat.min}^{-1}$) (Figure 44).

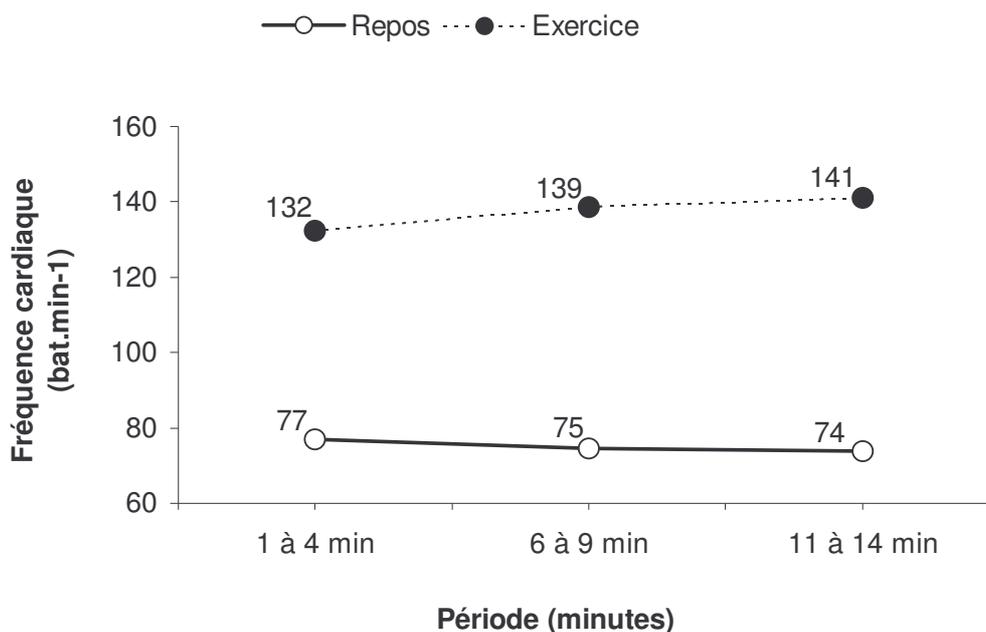


Figure 44. Evolution de la fréquence cardiaque (bat.min^{-1}) au cours de la tâche en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Concernant la fréquence de pédalage (FP), le plan d'expérience était composé d'un facteur période à trois modalités. Les résultats mettent en évidence une augmentation constante de la FP au cours du bloc ($F(2, 22) = 33.94, p < .05$). La fréquence de pédalage

passé de 72 tr.min⁻¹ entre la 6^{ème} et la 9^{ème} minute, à 76 tr.min⁻¹ entre la 11^{ème} et la 14^{ème} minute, pour atteindre 79 tr.min⁻¹ entre la 16^{ème} et la 19^{ème} minute.

TAUX D'ERREURS

Le plan d'expérience de cette analyse était composé d'un facteur à mesures répétées à deux modalités : le facteur intensité d'exercice (repos versus 50% PMA).

Aucun effet de l'exercice ($F(1, 10) = 1.21$, $p = .29$; repos : $M = 0.33\%$ versus exercice : $M = 0.57\%$) n'a été mis en évidence au niveau du taux d'erreurs de réponse aux essais pièges. Aucune interaction ne s'est avérée significative.

EFFET DE L'EXERCICE ET DE L'INTENSITE DU SIGNAL SUR LES VARIABLES CHRONOMETRIQUES

L'effet de l'exercice physique et de l'intensité du signal sur la moyenne du TR, du TPM et du TM ont été appréhendés par l'intermédiaire de trois analyses de variance distinctes. Trois autres analyses ont ensuite été réalisées sur la variance du TR, du TPM et du TM. Le plan d'expérience était composé des deux facteurs à mesures répétées à deux modalités : le facteur intensité d'exercice (repos versus 50% PMA) et le facteur intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Temps de réaction

Un effet principal de l'exercice ($F(1, 10) = 6.12$, $p < .05$) et de l'intensité du signal ($F(1, 10) = 248.71$, $p < .05$) ont été observés au niveau du TR, ainsi qu'une interaction sous-additive entre l'intensité de l'exercice et l'intensité du signal ($F(1, 10) = 4.81$, $p = .05$). Les résultats montrent que l'effet d'amélioration induit par l'exercice physique est plus important pour un signal de forte intensité ($M = -10$ msec) que de faible intensité ($M = -7$ msec) (Figure 45).

Aucun effet de l'exercice, ni de l'intensité du signal n'a été observé au niveau de la variance du TR. Aucune interaction ne s'est révélée significative.

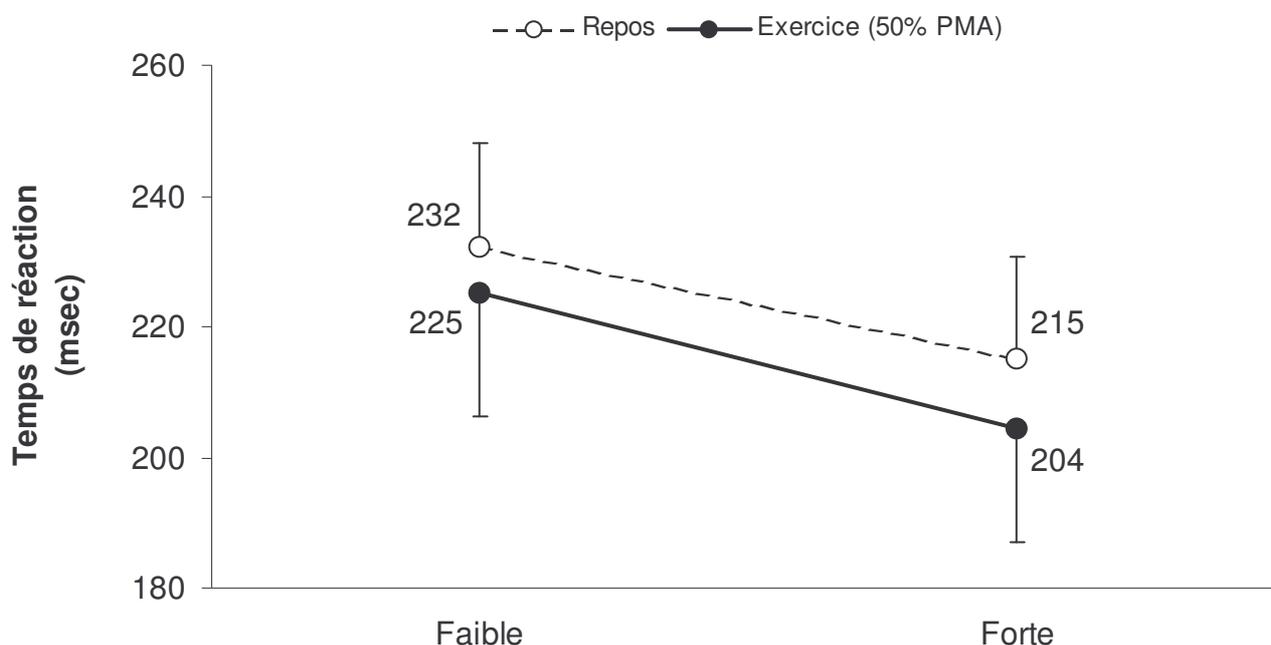


Figure 45. Temps de réaction (et écart-types) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Temps Pré-moteur

Au niveau du TPM, un effet principal de l'intensité du signal ($F(1, 10) = 239.30, p < .05$) a été observé. Lorsque le signal est de faible intensité le TPM est plus long ($M = 150$ msec) que lorsque le signal est de forte intensité ($M = 131$ msec) (Figure 46). Aucun autre effet simple, ni aucune interaction ne se sont avérés significatifs.

Aucun effet de l'exercice, ni aucune interaction n'ont été observés au niveau de la variance du TPM.

Temps Moteur

Au cours de l'exercice, on observe une diminution du TM ($M = 74$ msec) comparativement au repos ($M = 84$ msec) ($F(1, 10) = 9, p < .05$). L'effet de facilitation induit par l'exercice au niveau du TM est de 12 msec. Aucun autre effet, ni aucune interaction ne sont avérés significatifs.

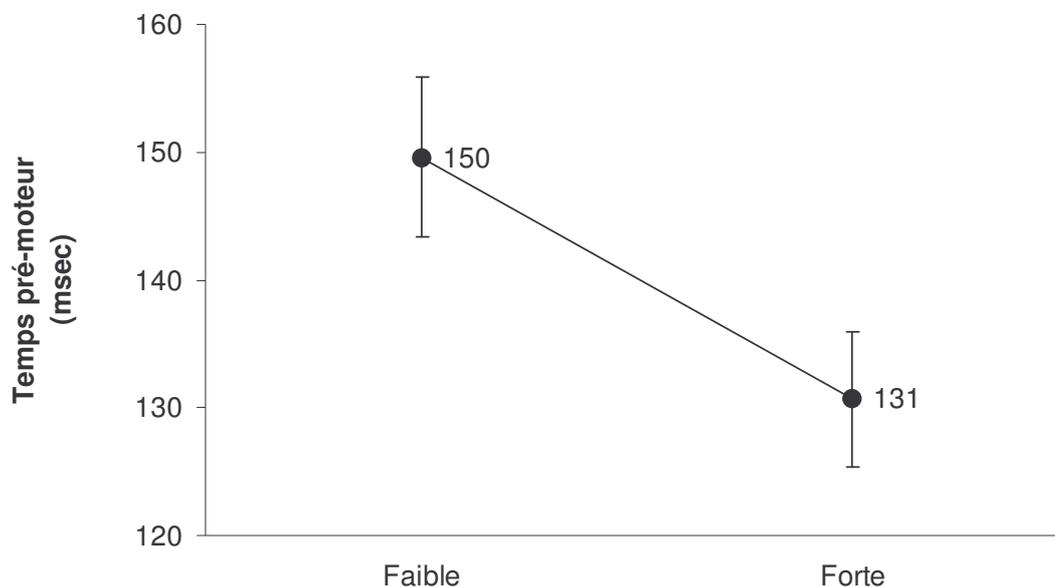


Figure 46. Temps pré-moteur (et écart-types) en fonction de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

ANALYSE DES DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION

L'effet de l'exercice physique sur les distributions de TR a été appréhendé par l'intermédiaire d'une série d'analyses de variance : une première analyse a été réalisée sur les valeurs de TR, une seconde sur les valeurs de TPM et une troisième sur les valeurs de TM. Les différents plans d'expérience étaient composés des deux facteurs à mesures répétées : le facteur intensité d'exercice à deux modalités (repos versus 50% PMA) et le facteur décile à dix modalités (10 tranches d'essais issues de la vincentisation).

Temps de réaction

Au niveau du TR, l'analyse révèle un effet principal de l'exercice ($F(1, 10) = 6.70, p < .05$) et un effet trivial du facteur décile ($F(9, 90) = 219.66, p < .05$). L'interaction entre ces deux facteurs n'est pas significative ($F(9, 90) = 0.93, p = .50$). L'exercice provoque un décalage de l'ensemble de la distribution de TR vers la gauche, sans modifier la forme de la courbe (Figure 47). On remarque que l'exercice physique affecte aussi bien les TR courts que

les TR longs et l'indice Delta montre que l'amplitude de cet effet ne varie pas en fonction des différents TR (4-12 ms) (encadré figurant à l'intérieur de la Figure 47).

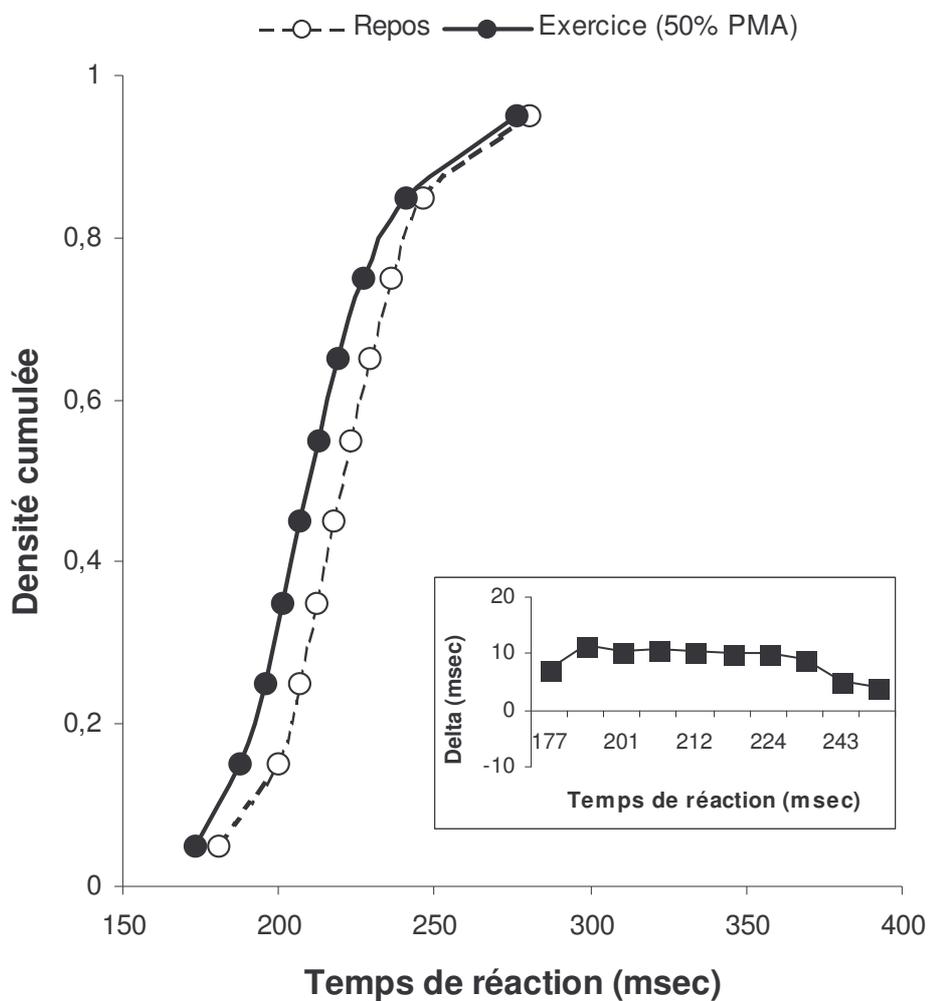


Figure 47. Distribution des Temps de réaction (msec) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Temps Pré-moteur

En ce qui concerne le TPM, l’analyse révèle uniquement un effet significatif du facteur décile ($F(9, 90) = 152.04, p < .05$). L’effet principal de l’exercice ($F(1, 10) = 0.46, p = .51$) et l’interaction entre les facteurs intensité de l’exercice et décile ne sont pas significatifs ($F(9, 90) = 0.89, p = .54$). L’exercice ne modifie pas la distribution de cette composante temporelle (Figure 48). Aucun effet notable n’est observé que ce soit au niveau des TPM longs ou des TPM courts (encadré figurant à l’intérieur de la Figure 48).

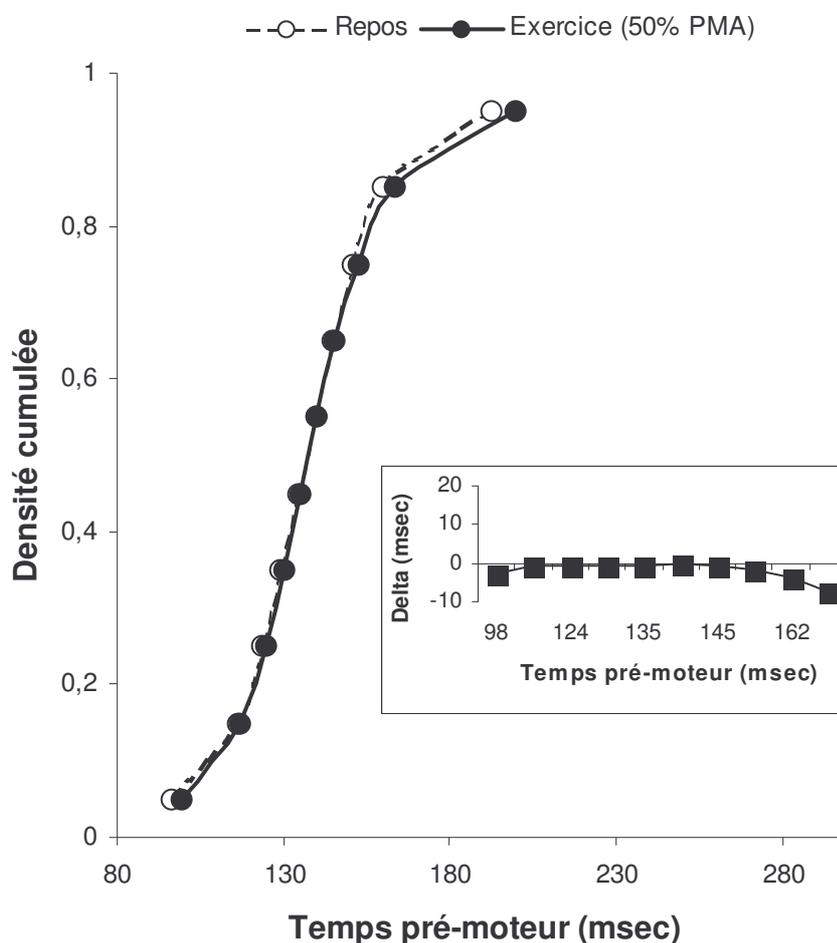


Figure 48. Distribution des Temps Pré-moteur (msec) en fonction de l’intensité de l’exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

Temps Moteur

Au niveau du TM, l’analyse statistique révèle un effet principal de l’exercice ($F(1, 10) = 9.01, p < .05$) et un effet trivial du facteur décile ($F(9, 90) = 184.04, p < .05$). L’interaction entre les facteurs intensité de l’exercice et décile n’est pas significative ($F(9, 90) = 1.08, p = 0.39$). L’exercice provoque un décalage de l’ensemble de la distribution des TM vers la gauche (Figure 49). La forme de la courbe reste inchangée. La réalisation d’un exercice physique affecte l’ensemble des TM. L’indice Delta (encadré figurant à l’intérieur de la Figure 49) montre que l’amplitude de l’effet de facilitation induit par l’exercice est identique pour l’ensemble des TM (8-12 ms).

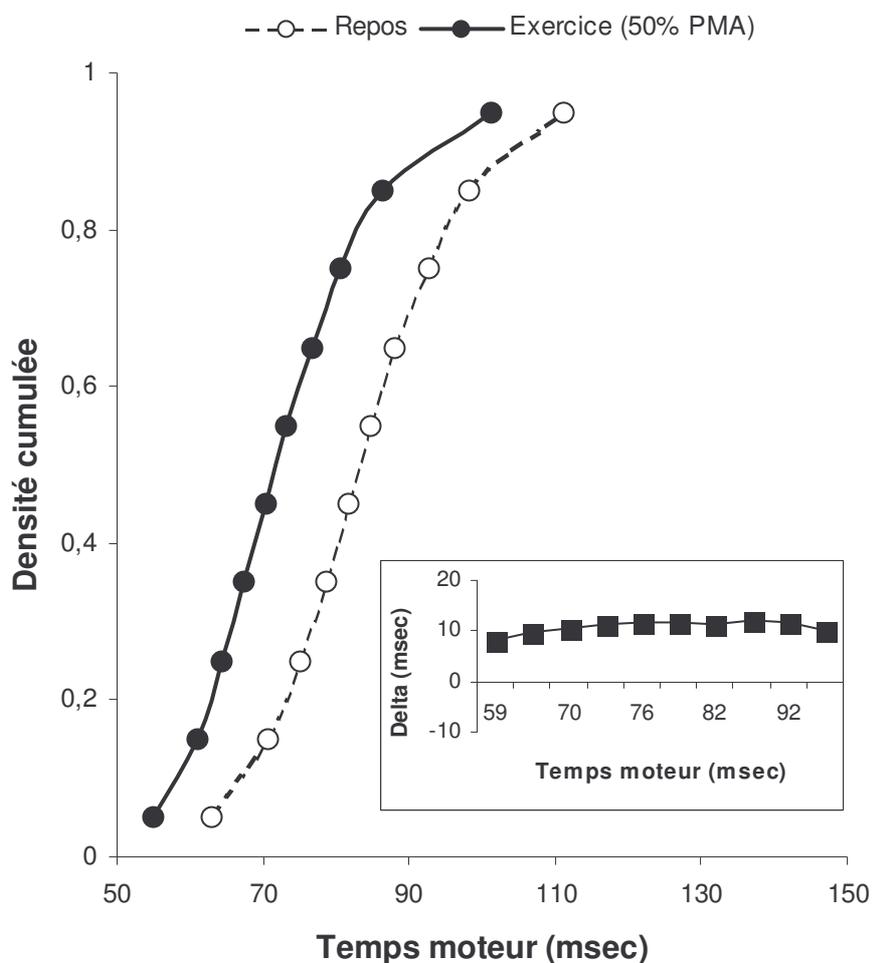


Figure 49. Distribution des Temps Moteur (msec) en fonction de l’intensité de l’exercice (repos -○- versus 50 % de PMA -●-).

EFFET DE L'EXERCICE SUR LA FORME DU SIGNAL ELECTROMYOGRAPHIQUE

L'analyse de la forme de la bouffée EMG en fonction des différentes conditions expérimentales a été appréhendée, d'une part, par l'intermédiaire d'une analyse de la pente ascendante des tracés EMG et, d'autre part, par la détermination de la surface sous les différentes courbes EMG enregistrées.

Le traitement des résultats a été effectué sur les données enregistrées dans une fenêtre de temps allant de 0 à 80 msec. La largeur de cette fenêtre a été déterminée objectivement par rapport au TM moyen toutes conditions confondues ($\underline{M} = 79$ msec). On considère que la première partie de cette fenêtre de temps (0 à 40 msec) indexe la partie ascendante de la courbe et que la deuxième partie (40 à 80 msec) reflète la partie descendante (Figure 50).

Les tracés EMG d'un sujet étant anormalement différents de ceux des autres sujets, nous avons préféré exclure les données de ce dernier de l'analyse statistique. En effet, les tracés EMG enregistrés en condition exercice (amplitude très importante et pente extrêmement raide) étaient tellement différents de ceux enregistrés au repos qu'ils laissaient supposer un changement dans la manière dont le sujet effectuait sa réponse motrice (changement de position). Les résultats présentés dans cette section reposent sur le traitement des données de 10 sujets. Le plan d'expérience des deux analyses statistiques était composé de deux facteurs à deux modalités : le facteur intensité d'exercice (repos versus 50% PMA) et le facteur intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

Pente ascendante des tracés électromyographiques

Les résultats révèlent un effet de la manipulation de l'intensité de l'exercice sur la pente ascendante de la bouffée EMG ($F(1, 9) = 7.14, p < .05$). Le coefficient de la pente du tracé EMG était supérieur à l'exercice ($\underline{M} = 1.96$) comparativement au repos ($\underline{M} = 1.34$) (Figure 50). La manipulation de l'intensité du signal impératif de réponse n'a eu aucune conséquence notable sur la pente de la courbe EMG ($F(1, 9) = 0.56, p = .47$). L'interaction entre l'exercice et l'intensité du signal n'était pas significative ($F(1, 9) = 0.81, p = .39$).

Surface sous les tracés électromyographiques

Suite à l'analyse de la surface totale située sous la courbe EMG (fenêtre 0 à 80 msec), en fonction des différentes conditions expérimentales, aucun effet ni aucune interaction ne s'approchait du seuil de significativité statistique.

En revanche, la surface sous la partie ascendante de la courbe EMG (fenêtre 0 à 40 msec) était plus importante à l'exercice qu'au repos ($F(1, 9) = 8.03, p < .05$). Aucune différence significative n'a été observée au niveau de la partie descendante de la courbe (fenêtre 40 à 80 msec) ($F(1, 9) = 0.34, p = .57$) (Figure 50). Aucun effet de l'intensité du signal n'a été observé au niveau de la phase ascendante ($F(1, 9) = 1.18, p = .31$), ni au niveau de la phase descendante de la courbe ($F(1, 9) = 1.42, p = .26$). Aucune interaction ne s'est révélée significative.

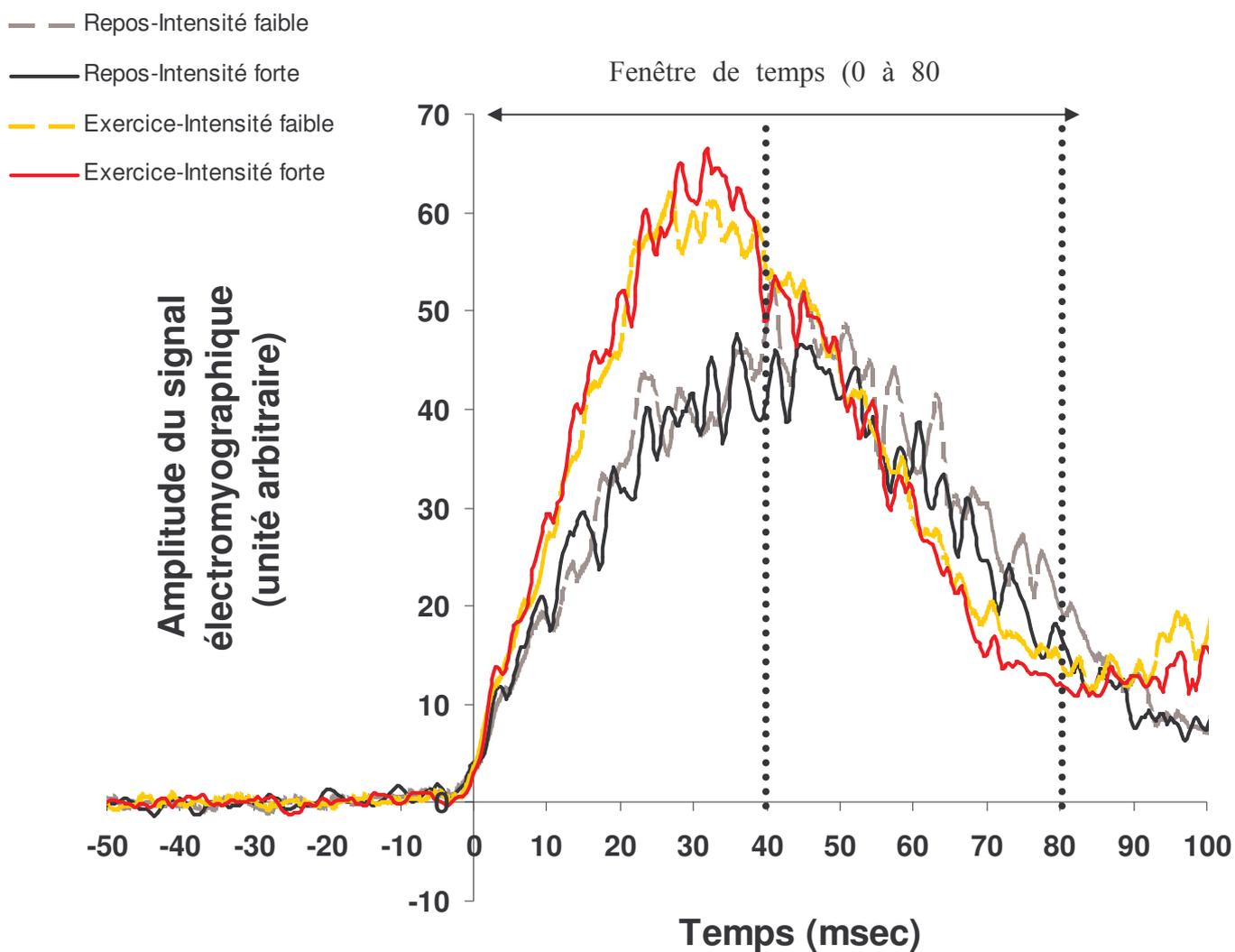


Figure 50. Représentation graphique des grands moyennages des courbes électromyographiques redressées (non lissées) en fonction de l'intensité de l'exercice (repos versus 50% PMA) et de l'intensité du signal (intensité faible versus intensité forte).

DISCUSSION

Ce protocole expérimental a été mis en place afin de vérifier, d'une part, la possibilité d'observer un effet de facilitation induit par un exercice physique lors de la réalisation d'une tâche cognitive simple et de confirmer, d'autre part, la localisation de cet effet au niveau des processus périphériques sensoriels et moteurs. L'objectif principal de cette étude était de reproduire les résultats précédemment observés lors de la réalisation d'une tâche de TRC. Le cadre d'inférence de cette étude ainsi que la manipulation de l'intensité de l'exercice sont identiques à ceux de l'expérience 3, seule la complexité de la tâche cognitive diffère entre ces deux études.

EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE

Au cours de l'exercice, l'évolution de la fréquence cardiaque et de la fréquence de pédalage est similaire à celle observée précédemment. Effectivement, nous observons de nouveau une augmentation de la fréquence cardiaque (mise en place de mécanismes de thermorégulation, libération concomitante d'adrénaline), ainsi qu'une augmentation de la fréquence de pédalage (adaptation spontanée du sujet en fonction de la durée de l'épreuve).

EFFETS DE L'INTENSITE DU SIGNAL

Les effets de la manipulation de l'intensité du signal confirment les résultats de la précédente expérience, ainsi que ceux de Rihet *et al.* (1999). En effet, comparativement à un signal de faible intensité lumineuse, le TR est plus court lorsque le signal est de forte intensité. De plus, la manipulation de l'intensité du signal affecte uniquement la composante pré-motrice et n'a aucune influence sur la composante motrice du TR. D'une modalité à l'autre, l'effet de l'intensité du signal a une amplitude de 19 msec au niveau du TR. Le fractionnement du TR montre que la totalité de cet effet apparaît au niveau du TPM ($\Delta = 18.96$ msec), en revanche le TM reste inchangé ($\Delta = 0.09$ msec).

EFFETS DE L'EXERCICE SUR LE TEMPS DE REACTION ET L'ACTIVITE ELECTROMYOGRAPHIQUE

Conformément aux résultats attendus, l'effet de facilitation des performances cognitives induit par un exercice physique est également observable lors de la réalisation d'une tâche de TRS. L'absence d'effet ou la dégradation des performances observées généralement dans la littérature ne semblent donc pas liées aux caractéristiques de la tâche cognitive. En contrepartie, le maintien d'une cadence de pédalage imposée dans de nombreux protocoles pourrait être à l'origine de cette absence d'effet. De plus, on peut penser que l'utilisation d'un faible nombre d'essais est susceptible de masquer l'effet de facilitation induit par l'exercice. En effet, rappelons que les résultats de la deuxième étude suggèrent une augmentation de l'amplitude de l'effet de facilitation en fonction du temps passé sur la tâche. Or, on remarque que les performances cognitives sont généralement enregistrées sur une période de temps relativement brève (e.g., 1 minute) (Delignières *et al.*, 1993) ou sur 15 à 20 essais de TR (McMorris & Keen, 1994 ; Brisswalter *et al.*, 1995, 1997).

Dans notre étude, l'enregistrement des performances de temps réaction simple (192 essais) au cours de la réalisation d'un exercice de pédalage sous-maximal, sans aucune contrainte vis-à-vis de la fréquence de pédalage, met clairement en évidence un effet d'amélioration des performances. L'effet de facilitation induit par l'exercice apparaît non seulement au niveau du TR ($\Delta = 9$ msec), mais également au niveau du TM ($\Delta = 11$ msec). De plus, les résultats de cette étude confirment le décalage de l'ensemble des distributions de TR et de TM vers la gauche pendant l'exercice. Tous les TR sont affectés de la même manière, et l'influence de l'exercice touche plus particulièrement la durée de la composante motrice du TR.

Si l'on considère que les variations du TM reflètent la vitesse de contraction musculaire et une partie de l'exécution de la réponse, on peut penser que l'exercice affecte essentiellement les étapes périphériques motrices du traitement de l'information. L'amplitude de l'effet de l'exercice, au niveau du TM, laisse tout de même penser que l'étape d'ajustement moteur pourrait également être affectée par l'exercice physique. Cependant, le protocole expérimental de cette étude ne permet pas de confirmer cette hypothèse.

En revanche, l'augmentation de la raideur de la pente du tracé électromyographique, d'une part, et de la surface sous la partie ascendante de la courbe, d'autre part, suggèrent

fortement une meilleure synchronisation de la décharge des motoneurones et une plus grande efficacité de la commande cortico-spinale à l'exercice.

L'observation d'un patron d'interaction entre l'intensité du signal et l'exercice physique plaide en faveur d'un effet de l'exercice au niveau des étapes sensorielles de traitement. Conformément aux résultats de l'expérience 3, l'interaction est de type sous-additive. L'exercice physique affecterait donc un processus distinct de celui influencé par la manipulation de l'intensité du signal, mais opérant en parallèle au niveau du même stade de traitement.

En résumé, les résultats de cette quatrième expérience sont parfaitement identiques à ceux de l'expérience précédente. L'effet de facilitation induit par l'exercice apparaît aussi bien lors de la réalisation d'une tâche de TRS que d'une tâche de TRC. Cette étude suggère que l'effet de l'exercice est indépendant de la complexité de la tâche cognitive et confirme la localisation de cet effet au niveau des processus périphériques moteurs (vitesse de contraction musculaire) ainsi qu'au niveau des processus sensoriels de traitement de l'information (étape de pré-traitement du signal).

TROISIEME PARTIE – DISCUSSION GENERALE

Notre travail avait pour but de préciser l'effet de facilitation des performances cognitives, induit par la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale constante, et de localiser cet effet au sein de la chaîne de traitement de l'information. Dans cette optique de recherche, une série d'expériences a été mise en place afin d'observer une amélioration des performances cognitives. Suivant les recommandations méthodologiques de Tomporowski et Ellis (1986) et de Brisswalter et Legros (1996), une attention particulière a été accordée aux caractéristiques physiologiques et cognitives de la double tâche, ainsi qu'à la sélection de la population d'étude. Conformément aux résultats de la littérature, il ressort de ce travail qu'un exercice sous-maximal engendre une amélioration des performances cognitives. Les conséquences de la réalisation d'un exercice physique sont non seulement observables au niveau de variables chronométriques (temps de réaction, temps moteur), mais également au niveau de variables électrophysiologique (pente du tracé EMG rectifié et surface sous le tracé EMG), psychophysique (fréquence critique de fusion), et des sensations subjectives des sujets (vigilance et vigueur).

FACTEURS METHODOLOGIQUES FONDAMENTAUX

Les résultats de ce travail apportent à la fois des arguments en faveur de l'utilisation d'un protocole uniformisé et confirment l'importance du choix méthodologique de certaines variables, telles que la durée du protocole et la fréquence de pédalage. Ils suggèrent également l'utilisation du premier seuil ventilatoire, au cours de ce type de protocole expérimental, afin de déterminer l'intensité relative de travail.

Les conséquences du stress physiologique, induit par la réalisation d'un exercice, permettent d'une part, le maintien d'un niveau de performance constant lorsque l'intensité de la sollicitation est relativement faible (20% de la puissance maximale aérobie, PMA) et, d'autre part, une amélioration des performances cognitives lorsque l'intensité est plus importante (50% de PMA) (expérience 1). L'augmentation de l'amplitude de l'effet de facilitation en fonction du temps passé sur la tâche (expérience 2) suggère que l'exercice agit comme un facteur stimulant. Ces résultats, nous incitent à penser que la prise en considération d'un grand nombre d'essais favorise l'observation d'un effet de facilitation. Avec le temps passé sur la tâche, les modifications neuro-hormonales ainsi que l'émergence d'un état sous-

optimal de vigilance semblent expliquer l'amélioration des performances cognitives observée au cours des différentes expériences. De plus, l'évolution de la fréquence de pédalage confirme l'émergence d'un comportement d'adaptation spontanée en fonction de la durée de l'exercice. Cette observation, associée à une amélioration systématique des performances cognitives, indépendamment de la complexité de la tâche, laisse penser que le choix d'une cadence librement choisie favorise également l'observation d'un effet de facilitation. Ainsi, le système de traitement n'est pas surchargé et l'adaptation spontanée du sujet est favorisée.

Au cours de ce travail, une diminution du temps de réaction (TR) a été observée lors de la réalisation d'un exercice à 50% de PMA et à une intensité égale à 90% du premier seuil ventilatoire. Bien que ces deux intensités de travail semblent propices à l'observation d'un effet d'amélioration des performances cognitives, l'utilisation du seuil ventilatoire est particulièrement intéressante car elle permet, d'une part, de caractériser précisément les processus métaboliques sollicités et, d'autre part, de réduire la variabilité de la population d'étude. Compte tenu de la faible amplitude de l'effet de l'exercice, il est nécessaire de minimiser l'influence de la variabilité interindividuelle afin d'étudier les interactions entre les modifications physiologiques et les processus informationnels. Ainsi, la prise en considération des deux indices (% de PMA et % du seuil ventilatoire) apparaît comme une précaution méthodologique pertinente car elle permet à la fois de déterminer une intensité relative de travail identique pour l'ensemble des sujets, mais également un travail mécanique sollicitant les mêmes processus énergétiques.

LIMITES DE LA METHODE DES FACTEURS ADDITIFS ET INTERET DE LA TECHNIQUE ELECTROMYOGRAPHIQUE

L'objectif de la première étude était de localiser l'effet de facilitation par l'intermédiaire de la Méthode des Facteurs Additifs (MFA) de Sternberg (1969, 2001) en manipulant trois facteurs cognitifs connus pour affecter des étapes de traitement distinctes : la qualité du signal, la compatibilité stimulus-réponse et l'incertitude temporelle. Malgré l'observation d'un effet de facilitation, l'absence d'interaction ne nous a pas permis de localiser l'effet de l'exercice, ni de vérifier les prédictions d'Arcelin *et al.* (1998) concernant la localisation de l'effet de l'exercice au niveau du stade d'ajustement moteur. En

contrepartie, cette étude a clairement mis en évidence les limites de la MFA et l'intérêt de mettre en place des protocoles alternatifs, visant à localiser l'effet de facilitation induit par l'exercice physique par l'intermédiaire d'autres variables dépendantes que le TR moyen.

Bien que la MFA reste une méthode heuristique valide, la puissance inférencielle de cette méthode semble cependant avoir des limites. Rappelons que dans le cadre de la première expérience, aucune interaction n'a été mise en évidence entre l'exercice et la durée de la période préparatoire. Interprété dans le cadre de la logique des facteurs additifs, ce résultat suggère que l'effet de l'exercice n'affecte pas l'étape d'ajustement moteur. Or, le fractionnement du TR en deux composantes chronométriques, nous a permis à deux reprises (expérience 3 et 4) d'observer une diminution du temps moteur (TM) suggérant une influence spécifique de l'exercice au niveau des processus périphériques moteurs de traitement.

D'autre part, une analyse de la littérature montre que l'utilisation de la MFA, dans le but de localiser l'effet d'un facteur expérimental donné (i.e., fluvoxamine, lévodopa), a déjà conduit à l'observation de résultats relativement contradictoires (e.g., Hasbroucq *et al.*, 2003 ; Rihet *et al.*, 1999, 2002). Comme cela s'avère être le cas dans notre étude, l'utilisation du TR fractionné s'avère alors être un outil particulièrement intéressant. En effet, l'enregistrement de l'électromyogramme (du muscle agoniste impliqué dans la réponse requise) confirme d'une part les réserves émises vis-à-vis de l'interprétation des patrons d'additivité observés, mais permet également de localiser l'effet du facteur manipulé. Ainsi, Rihet *et al.* (1999) ont observé une diminution du temps moteur sous fluvoxamine, malgré l'absence d'interaction entre la fluvoxamine et la composition du répertoire moteur. De la même façon, malgré l'absence d'interaction entre la lévodopa et la période préparatoire (Rihet *et al.*, 2002), une diminution du TM a également été observée sous levodopa (Hasbroucq *et al.*, 2003). Dans ces deux études, les données EMG suggèrent que la fluvoxamine et la lévodopa affectent des processus périphériques moteurs de traitement, bien qu'aucune interaction avec le répertoire ou la période préparatoire n'ai été observée.

Les raisons de cette absence de résultats concluants, lors de l'utilisation de la MFA restent inexpliquées. Toutefois, les conditions expérimentales mises en œuvre dans le cadre des différentes expériences de ce mémoire, ne sont peut être pas les meilleures pour observer un patron d'interaction. En effet, la manipulation des facteurs expérimentaux se limite à deux modalités et le nombre de sujets est peut être insuffisant. Cependant, un certain nombre

d'observations suggère que les limites de cette logique apparaissent généralement lors de la localisation de l'effet d'un *facteur stimulant* affectant des *processus périphériques moteurs* de traitement.

En effet, il semblerait que les limites de la MFA concernent principalement la localisation de l'effet de facteurs stimulants (i.e., nicotine, exercice, fluvoxamine, levodopa). Bien qu'il ne s'agisse que de simples observations (peut être fortuites), il semblerait que cette logique d'inférence reste tout à fait pertinente lorsque le facteur étudié est un facteur expérimental ralentissant la vitesse de traitement de l'information. Par exemple, l'observation d'une interaction entre la kétamine et la durée de la période préparatoire suggère clairement une influence de la kétamine au niveau des processus moteurs (Guillermain, Micallef, Possamaï, Blin & Hasbroucq, 2001 ; Micallef, Guillermain, Tardieu, Hasbroucq, Possamaï, Jouve & Blin, 2002).

Par ailleurs, si la MFA ne s'avère pas être un outil d'inférence systématiquement adapté à la localisation de l'effet d'un facteur expérimental au niveau des processus périphériques moteurs ; elle reste pertinente lorsqu'il s'agit de localiser l'influence du même facteur au niveau des processus sensoriels (expérience 3 et 4 ; Hasbroucq *et al.*, 2003). Ainsi, cette logique d'inférence a permis de localiser l'effet de l'exercice ainsi que de la levodopa au niveau de l'étape de pré-traitement du signal, mais n'a pas été en mesure de mettre en évidence l'influence de ces deux facteurs au niveau des processus moteurs de traitement. A cette première observation s'ajoutent les résultats de l'étude d'Hasbroucq *et al.* (1995) concernant les effets de la manipulation conjointe de la complexité du répertoire de réponse et de la durée de la période préparatoire. Au cours de cette expérience, contrairement aux attentes des auteurs, aucune interaction n'a été observée au niveau du TR entre les effets des deux facteurs manipulés. En revanche, la même interaction s'est avérée significative au niveau du TM.

L'ensemble de ces résultats suggère que la faiblesse de la MFA pourrait être liée à la présence d'une variabilité plus importante au niveau du TR qu'au niveau des composantes chronométriques issues du fractionnement du TR.

LIMITES DE L'INTERPRETATION DES ANALYSES DE DISTRIBUTIONS DE TEMPS DE REACTION

La deuxième expérience de ce mémoire, a été mis en place afin de déterminer la nature computationnelle ou énergétique de l'effet d'un exercice physique. D'après Sanders (1983), deux méthodes permettent de définir la nature d'un facteur expérimental. La première méthode consiste à étudier les conséquences de la manipulation d'un facteur sur la forme de la distribution de TR. La deuxième méthode consiste à étudier l'évolution de l'amplitude de l'effet du facteur manipulé en fonction du temps passé sur la tâche. Compte tenu des réserves émises par Smulders *et al.* (1997), il nous a semblé intéressant de vérifier la pertinence de l'utilisation de l'analyse des distributions de TR dans le cadre de cette logique d'inférence. Il ressort de ce travail, que l'analyse des distributions de TR ne s'avère pas être un outil d'inférence adapté à la détermination de la nature computationnelle ou énergétique d'un facteur expérimental. En revanche, l'évolution des performances cognitives en fonction du temps passé sur la tâche permet d'établir cette distinction.

L'analyse de distributions de TR reste cependant un outil particulièrement intéressant pour étudier le traitement de l'information, car il permet de décrire précisément la façon dont un facteur expérimental influence les performances cognitives. En effet, les informations recueillies par l'intermédiaire de cette méthode (expérience 2, 3 et 4) sont beaucoup plus fines que de simples indices de tendance centrale. Contrairement aux observations d'Arcelin *et al.* (1998), il s'avère que l'amélioration des performances cognitives, mise en évidence au niveau du TR moyen, résulte d'un décalage de la distribution c'est-à-dire d'une amélioration de l'ensemble des essais. La vision globale de l'ensemble des TR recueillis au cours des différents protocoles, permet également d'établir que l'amplitude de l'effet est identique pour tous les types d'essais. Par ailleurs, l'analyse des distributions réalisée à l'issue du fractionnement du TR en deux composantes chronométriques (expérience 3 et 4) confirme d'une part, l'absence d'effet au niveau de la composante pré-motrice et, d'autre part, l'amélioration de l'ensemble des TM des différents essais.

LOCALISATION DE L'EFFET DE FACILITATION INDUIT PAR UN EXERCICE

Au cours de deux dernières expériences de ce mémoire, l'utilisation d'un cadre d'inférence reposant à la fois sur le fractionnement du temps de réaction et sur la logique des facteurs additifs de Sternberg (1969), suggère clairement que l'exercice affecte les processus périphériques moteurs et sensoriels de traitement de l'information. En effet, les résultats montrent que le TR, enregistré au cours de tâches de temps de réaction simple (TRS) et de temps de réaction choix (TRC), est plus court à l'exercice qu'au repos et que l'exercice interagit avec l'intensité du signal. L'enregistrement EMG révèle également une diminution du TM pendant l'exercice.

Malgré le fait que les processus périphériques situés à l'entrée et à la sortie du système soient influencés par l'exercice, l'amélioration du TR semble essentiellement due à une diminution de la durée des étapes motrices. Par ailleurs, l'analyse de la forme du tracé EMG rectifié suggère que le changement, observé au niveau des processus périphériques moteurs, s'explique par une meilleure synchronisation de la décharge des motoneurones et une plus grande efficacité de la commande cortico-spinale à l'exercice.

L'ensemble des résultats de ce travail est tout à fait compatible avec l'hypothèse explicative, généralement avancée dans la littérature, suggérant que l'amélioration des performances cognitives à l'exercice résulte d'une augmentation du niveau d'activation médiée par une libération de catécholamines. En effet, l'augmentation des valeurs de fréquence critique de fusion confirme, d'une part, l'hypothèse d'une élévation du niveau d'éveil cortical des sujets immédiatement après l'exercice. D'autre part, l'interaction avec l'intensité du signal et à la présence de récepteurs dopaminergiques au niveau rétinien suggèrent que cet effet est probablement lié à une libération de catécholamines pendant l'exercice. Par ailleurs, les résultats observés au cours des deux dernières études sont relativement comparables à ceux observés par Hasbroucq *et al.* (2003) suite à une administration de lévodopa. Il ressort de ces résultats qu'une augmentation de la concentration de dopamine dans le système nerveux, qu'elle soit artificielle (levodopa) ou naturelle (exercice), semble diminuer la durée des processus périphériques sensoriels et moteurs de traitement.

PERSPECTIVES

Plusieurs questions restent cependant ouvertes, on peut notamment s'interroger sur la nature des changements responsables de l'augmentation de la vitesse de contraction musculaire et de l'amélioration de l'efficacité de la commande cortico-spinale. Bien que les résultats de ce travail aillent dans le sens d'une amélioration des performances induite par une libération de catécholamines, cette hypothèse reste à vérifier. En effet, comme le suggèrent McMorris *et al.* (1999) il est possible que d'autres changements biochimiques ou hormonaux, résultants d'une modification de la concentration de catécholamines soient responsables de cet effet de facilitation.

Les résultats observés grâce à l'enregistrement de l'activité EMG montrent clairement qu'un exercice physique d'intensité sous-maximale affecte les processus moteurs de traitement et notamment la vitesse de contraction. Dans le but de préciser la localisation de cet effet, il serait intéressant de mettre en place un protocole expérimental impliquant la manipulation de la complexité du répertoire de réponse et de la durée de la période préparatoire (3 modalités) afin de tester l'influence de l'exercice respectivement au niveau des étapes de programmation motrice et d'ajustement moteur. Etant donné la difficulté de mettre en évidence certains patterns d'interaction, il semble également pertinent d'enregistrer l'activité EMG afin de fractionner le TR et de diminuer ainsi la variabilité.

Concernant ce dernier point, rappelons que l'absence de résultat concluant, lors de l'utilisation de la MFA, reste inexpliquée. Aussi, il semble important d'approfondir la question et de s'interroger sur la pertinence et les limites de cette logique d'inférence.

Enfin, le protocole expérimental mis en place dans le cadre de mon travail de DEA ne nous a pas permis de localiser l'effet de la nicotine au niveau du système de traitement de l'information. Or, la similitude entre les résultats de ce travail et ceux de la première expérience de ce mémoire est assez remarquable. Etant donné que l'utilisation d'indices électromyographiques et le fractionnement du TR nous a permis de localiser l'effet de l'exercice, tout nous pousse à croire que nous sommes actuellement capables de localiser l'influence de la nicotine au niveau du traitement de l'information sensorimotrice. En effet, la mise en œuvre d'un protocole globalement identique à celui des deux dernières expériences de ce mémoire devrait maintenant nous permettre d'élucider cette question restée en suspend.

BIBLIOGRAPHIE

- Abernethy, B. (1988). Dual-task methodology and motor skills research: Some applications and methodological constraints. Journal of Human Movement Studies, 14, 101-132.
- Allain, S., Carbonnell, L., Burle, B., Hasbroucq, T., & Vidal, F. (sous presse). On-line executive control: An electromyographic study.
- Arcelin, R. (1999). Interactions entre la sollicitation des processus physiologiques lors d'un exercice aérobic et le fonctionnement cognitif. [Interactions between physiological processes during acute aerobic exercise and mental functioning]. Mémoire de thèse, Université de Poitiers.
- Arcelin, R., Brisswalter, J., & Delignières, D. (1997). Effect of physical exercise duration on decisional performance. Journal of Human Movement Studies, 32, 123-140.
- Arcelin, R., Delignières, D., & Brisswalter, J. (1998). Selective effects of physical exercise on choice reaction processes. Perceptual and Motor Skills, 87, 175-185.
- Audiffren, M., Brisswalter, J., Brandet, J.-P., & Bosquet, L. (1998). Coût attentionnel d'une tâche de pédalage en fonction de l'intensité d'exercice. Science & Sports, 13, 93-95.
- Bacher, F. (1987). Les modèles structuraux en psychologie. Présentation d'un modèle : Lisrel, deuxième partie. Le Travail Humain, 51, 272-288.
- Bardy, B. (1991). Le paradigme de la double tâche: Intérêts pour le champ d'étude des habiletés motrices complexes. Science et Motricité, 15, 31-39.
- Beehler, P.J., Kamen, G., & Morris, H.H. (1991). Stimulus intensity and experimental design effects on motor response processing. Research Quarterly for Exercise and Sport, 62(3), 267-75.
- Bond, A., & Lader, M. (1974). The use of analogue scales in rating subjective feeling. British Journal of Medical Psychology, 47, 211-218.
- Botwinick, J., & Thompson, L.W. (1966). Premotor and motor components of reaction time. Journal of Experimental Psychology, 71(1), 9-15.
- Burle, B., & Bonnet, M. (1999). What's an internal clock for? From temporal information processing to temporal processing of information. Behavioral Processes, 45, 59-72.
- Burle, B., Possamaï, C.A., Vidal, F., Bonnet, M., & Hasbroucq, T. (2002). Executive control in the Simon effect: An electromyographic and distributional analysis. Psychological Research, 66(4), 324-36.
- Brisswalter, J., Arcelin, R., Audiffren, M., & Delignières, D. (1997). Influence of physical exercise on simple reaction time: Effect of physical fitness. Perceptual and Motor Skills, 85, 1019-1027.

- Brisswalter, J., Collardeau, M., & Arcelin, R. (2002). Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. Sports Medicine, *32*(9), 555-66.
- Brisswalter, J., Durand, M., Delignières, D., & Legros, P. (1995). Optimal and non-optimal demand in a dual task of pedalling and simple reaction time: Effects on energy expenditure and cognitive performance. Journal of Human Movement Studies, *29*, 15-34.
- Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., & Vallier, J.M. (2000). Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling: Effect of exercise duration. International Journal of Sports Medicine, *21*(1), 60-4.
- Brisswalter, J., Legros, P., & Delignières, D. (1994). Interactions entre processus cognitifs et physiologiques. Science et Motricité, *23*, 25-31.
- Brisswalter, J., & Legros, P. (1996). Interactions entre les processus physiologiques et cognitifs: Modèles théoriques et approche méthodologique. Science & Sports, *11*, 71-80.
- Cayrou, S., Dickes, P., Gauvin-Piquard, A., Dolbeault, S., Callahan, S., & Roge, B. (2000). Validation de la traduction française du POMS (Profile Of Mood States). Psychologie et Psychométrie, *21*(4), 5-22.
- Chmura, J., Krysztofiak, H., Ziemia, A.W., Nazar, K., & Kaciuba-Uscilko, H. (1998). Psychomotor performance during prolonged exercise above and below the blood lactate threshold. European Journal of Applied Physiology and Occupational physiology, *77*, 77-80.
- Chmura, J., Nazar, K., & Kaciuba-Uscilko, H. (1994). Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine threshold. Journal of Sports Medicine, *15*, 172-176.
- Coast, J.R., & Welch, H.G. (1985). Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. European Journal of Applied Physiology and Occupational physiology, *53*(4), 339-42.
- Collardeau, M. (2001). Effet d'un exercice sous-maximal prolongé sur la performance cognitive. [Effect of prolonged submaximal exercise on cognitive performance]. Mémoire de thèse, Université de Toulon et du Var.
- Collardeau, M., Brisswalter, J., & Audiffren, M. (2001). Effects of a prolonged run on simple reaction time of well trained runners. Perceptual and Motor Skills, *93*(3), 679-89.
- Collardeau, M., Brisswalter, J., Vercruyssen, F., Audiffren, M., & Goubault, C.(2001). Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: Influence of carbohydrate availability. European Journal of Applied Physiology, *86*(2), 150-6.
- Courtière, A., Hardouin, J., Hasbroucq, T., Possamaï, C., & Vidal, F. (2000). The additive factor method in rat information processing. Behavioral Processes, *50*(2-3), 113-121.
- Courtière, A., Hardouin, J., Vidal, F., Possamaï, C.A., & Hasbroucq, T. (2003). An additive

- factor analysis of the effect of sub-anaesthetic doses of nitrous oxide on information processing: evidence for an impairment of the motor adjustment stage. Psychopharmacology, 165(4), 321-8.
- Cousineau, D., & Larochelle, S. (1997). PASTIS: A program for curve and distribution analyses. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 29(4), 542-548.
- Cronbach, L.J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika, 16, 296-334.
- Davis, H.A., Basset, J., Hugues, P., & Gass, G.C. (1983). Anaerobic threshold and lactate turnpoint. European Journal of Applied Physiology, 50, 383-392.
- Davranche, K., & Audiffren, M. (2002a). Effects of a low dose of transdermal nicotine on information processing. Nicotine & Tobacco Research, 4(3), 275-85.
- Davranche, K., & Audiffren, M. (2002b). Cognitive processes improvement induced by moderate physical exercise. Actes du Congrès International Mouvement, Attention & Perception, 122.
- Delignières, D., & Brisswalter, J. (1994). Influence d'une tâche de marche sur le temps de réaction simple: Effet de la nature du signal et de l'efficacité de la locomotion. Actes du Congrès International de la Société Française de Psychologie du Sport, 205-206.
- Delignières, D., Brisswalter, J., & Legros, P. (1993). Influence d'une tâche de pédalage ajoutée sur le temps de réaction simple et de choix. Actes des Vèmes Journées Internationales d'Automnes de l'ACAPS, 15-16.
- Delignières, D., Brisswalter, J., & Legros, P. (1994a). Influence of physical exercise on choice reaction time in sports experts: The mediating role of resource allocation. Journal of Human Movement Studies, 27, 173-188.
- Delignières, D., Famose, J.P., & Genty, J. (1994b). Validation d'une échelle de catégories pour la perception de la difficulté. Staps, 34, 77-88.
- Donders, F.C. (1968). On the speed of mental processes. In W.G. Koster (Ed.), Attention and Performance II. (pp. 412-431). Amsterdam: North Holland.
- Duncan-Johnson, C.C., & Donchin, E. (1982). The P300 component of the event-related brain potential as an index of information processing. Biological Psychology, 14(1-2), 1-52.
- Eriksen, C.W., Coles, M.G.H., Morris, L.R., & O'Hara, W.P. (1985). An electromyographic examination of response competition. Bulletin of the Psychonomic Society, 23, 165-168.
- Etter, J.F., Duc, T.V., & Perneger, T.V. (1999). Validity of the Fagerstrom test for nicotine dependence and of the Heaviness of Smoking Index among relatively light smokers. Addiction, 94(2), 269-81.
- Fernandes, O., Sabharwal, M., Smiley, T., Pastuszak, A., Koren, G., & Einarson, T. (1998).

- Moderate to heavy caffeine consumption during pregnancy and relationship to spontaneous abortion and abnormal fetal growth: A meta-analysis. Reproductive Toxicology, 12(4), 435-444.
- Fischer, H.G., Hollmann, W., & De Meirleir, K. (1991). Exercise changes in plasma tryptophan fractions and relationship with prolactin. International Journal of Sports Medicine, 12(5), 487-9.
- Fowler, B., Hofer, K., & Lipitkas, J. (2000). The exhaustive additivity displayed by nitrous oxide has implications for cognitive-energetical theory. Biological Psychology, 52(2), 161-80.
- Fowler, B., Hofer, K., & Lipitkas, J. (2001). A new stage and cognitive-energetical theory: A reply to Smulders and van der Molen (2000). Biological Psychology, 50, 233-37.
- Fowler, B., & Mitchell, I. (1997). Biological determinants of P300: The effects of a barbiturate on latency and amplitude. Biological Psychology, 46(2), 113-24.
- Gilbert, R.M., Marshman, J.A., Schwieder, M., & Berg, R. (1976). Caffeine content of beverages as consumed. Canadian Medical Association Journal, 114, 205-208.
- Guillermain, Y., Micallef, J., Possamaï, C., Blin, O., & Hasbroucq, T. (2001). N-methyl-D-aspartate receptors and information processing: human choice reaction time under a subanaesthetic dose of ketamine. Neuroscience Letter, 303(1), 29-32.
- Hammond, E.J., Meador, K.J., Aung-Din, R., & Wilder, B.J. (1987). Cholinergic modulation of human P3 event-related potentials. Neurology, 37(2), 346-50.
- Hasbroucq, T. (2001). Contribution à l'étude de la physiologie du traitement de l'information sensorimotrice : Approches expérimentales chez l'homme, le singe et le rat. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches en Neurosciences, Université de la Méditerranée, Marseille.
- Hasbroucq, T., Burle, B., Akamatsu, M., Vidal, F., & Possamaï, C.A. (2001). An electromyographic investigation of the effect of stimulus-response mapping on choice reaction time. Psychophysiology, 38(1), 157-62.
- Hasbroucq, T., Burle, B., Bonnet, M., Possamaï, C.A., & Vidal, F. (2002). Dynamique du traitement de l'information sensorimotrice : Apport de l'électrophysiologie. [Treatment dynamics in sensorimotor disorders: The contribution of electrophysiology]. Canadian Journal of Experimental Psychology, 56(2), 75-97.
- Hasbroucq, T., Mouret, I., Seal, J., & Akamatsu, M. (1995). Finger pairings in two-choice reaction time tasks: Does the between-hands advantage reflect response preparation? Journal of Motor Behavior, 27(3), 251-262.
- Hasbroucq, T., Possamaï, C.A., Bonnet, M., & Vidal, F. (1999). Effect of the irrelevant location of the response signal on choice reaction time: An electromyographic study in humans. Psychophysiology, 36(4), 522-6.

- Hasbroucq, T., Tandonnet, C., Micallef-Roll, J., Blin, O., & Possamaï, C.A. (2003). An electromyographic analysis of the effect of levodopa on the response time of healthy subjects. Psychopharmacology, *165*(3), 313-6.
- Heatherston, T.F., Kozlowski, L.T., Frecker, R.C., & Fagerstrom, K.O. (1991). The Fagerstrom Test for Nicotine Dependence: A revision of the Fagerstrom Tolerance Questionnaire. British Journal of Addiction, *86*(9), 1119-27.
- Humphreys, M.S., & Revelle, W. (1984). Personality, motivation, and performance: A theory of the relationship between individual differences and information processing. Psychological Review, *91*(2), 153-84
- Isaacs, L.D., & Pohlman, R.L. (1991). Effects of exercise intensity on an accompanying timing task. Journal of Human Movement Studies, *20*, 123-131.
- Jocoy, E.L., Arruda, J.E., Estes, K.M., Yagi, Y., & Coburn, K.L. (1998). Concurrent visual task effects on evoked and emitted auditory P300 in adolescents. International Journal of Psychophysiology, *30*(3), 319-28.
- Jöreskog, K.G., & Sörbom, D. (1984). LISREL IV. Chicago: National Educational Resources.
- Kahneman, D. (1973). Attention and Effort. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
- Kendall, F. P. & McCreary, E. K. (1988). Les muscles : Bilan et étude fonctionnelle. Paris : 3ème édition, Maloine.
- Kjaer, M. (1992). Regulation of hormonal and metabolic responses during exercise in humans. Exercise and Sport Sciences Reviews, *20*, 121-184.
- Knott, V., Bosman, M., Mahoney, C., Ilivitsky, V., & Quirt, K. (1999). Transdermal nicotine: Single dose effects on mood, EEG, performance, and event-related potentials. Pharmacology, Biochemistry and Behavior, *63*(2), 253-61.
- Kubitz, K.A., & Mott, A.A. (1996). EEG power spectral densities during and after cycle ergometer exercise. Research Quarterly for Exercise and Sport, *67*(1), 91-6.
- Külpe, O. (1895). Outlines of psychology. New York : Macmillan.
- Lennie, P. (1998). Single units and visual cortical organization. Perception, *27*(8), 889-935.
- Leth-Steensen, C., Elbaz, Z.K., & Douglas, V.I. (2000). Mean response times, variability, and skew in the responding of ADHD children: a response time distributional approach. Acta Psychologica, *104*(2), 167-90.
- Lorist, M.M., Snel, J., & Kok, A. (1994). Influence of caffeine on information processing stages in well rested and fatigued subjects. Psychopharmacology, *113*(3-4), 411-21.
- Luce, R.D. (1986). Response times, their role in inferring elementary mental organization. New York: Oxford University Press.

- Magliero, A., Bashore, T.R., Coles, M.G., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. Psychophysiology, *21*(2), 171-86.
- Magnié, M.N., Bermon, S., Martin, F., Madany-Lounis, M., Suisse, G., Muhammad, W., & Dolisi, C. (2000). P300, N400, aerobic fitness, and maximal aerobic exercise. Psychophysiology, *37*(3), 369-77.
- McGill, W.J. (1963). Stochastic latency mechanisms. In Handbook of Mathematical Psychology. New York: Wiley.
- McGuinness, D., & Pribram, K. (1980). The neuropsychology of attention: Emotional and motivational controls. In M. C. Wittrock (Ed.), The brain and psychology (pp. 95-139).
- McMorris, T., & Graydon, J. (1997). The effect of exercise on cognitive performance in soccer-specific tests. Journal of Sports Sciences, *15*, 459-468.
- McMorris, T., & Graydon, J. (1996a). The effect of exercise on the decision-making performance of experienced and inexperienced soccer players. Research Quarterly for Exercise and Sport, *67*(1), 109-114.
- McMorris, T., & Graydon, J. (1996b). Effect of exercise on soccer decision-making tasks of differing complexities. Journal of Human Movement Studies, *30*, 177-193.
- McMorris, T., & Graydon, J. (2000). The effect of incremental exercise on cognitive performance. International Journal of Sport Psychology, *31*(1), 66-81.
- McMorris, T., & Keen, P. (1994). Effect of exercise on simple reaction times of recreational athletes. Perceptual and Motor Skills, *78*, 123-130.
- McMorris, T., Myers, S., MacGillivray, W.W., Sexsmith, J.R., Fallowfield, J., Graydon, J., & Forster, D. (1999). Exercise, plasma catecholamine concentrations and decision-making performance of soccer players on a soccer-specific test. Journal of Sports Sciences, *17*, 667-676.
- Meeusen, R., & De Meirleir, K. (1995). Exercise and brain neurotransmission. Sports Medicine, *20*(3), 160-88.
- Meeusen, R., Piacentini, M.F., & De Meirleir, K. (2001). Brain microdialysis in exercise research. Sports Medicine, *31*(14), 965-83.
- Meijers, L.M., Teulings, J.L., & Eijkman, E.G. (1976). Model of the electromyographic activity during brief isometric contractions. Biological Cybernetics, *25*(1), 7-16.
- Micallef, J., Guillermain, Y., Tardieu, S., Hasbroucq, T., Possamaï, C., Jouve, E., & Blin, O. (2002). Effects of subanesthetic doses of ketamine on sensorimotor information processing in healthy subjects. Clinical Neuropharmacology, *25*(2), 101-6.
- Miller, J., van der Ham, F., & Sanders, A.F. (1995). Overlapping stage models and reaction time additivity: effects of the activation equation. Acta Psychologica, *90*(1-3), 11-28.

- Nissen, M.J. (1977). Stimulus intensity and information processing. Perception & Psychophysics, 22(4), 338-352.
- Norris, H. (1971). The action of sedatives on brain stem oculomotor systems in man. Neuropharmacology, 10, 181-191.
- Paas, F.G.C., & Adam, J.J. (1991). Human information processing during physical exercise. Ergonomics, 34(11), 1385-1397.
- Pachella, R.G. (1974). The interpretation of reaction time in information-processing research. In B. Kantowitz (Ed.), Human Information Processing: Tutorial in Performance and Cognition (pp. 41-82). New-York: Laurence Erlbaum Associates.
- Pagliari, R., & Peyrin, L. (1995a). Norepinephrine release in the rat frontal cortex under treadmill exercise: A study with microdialysis. Journal of Applied Physiology, 78(6), 2121-30.
- Pagliari, R., & Peyrin, L. (1995b). Physical conditioning in rats influences the central and peripheral catecholamine responses to sustained exercise. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 71(1), 41-52.
- Parkin, C., Fairweather, D.B., Shamsi, Z., Stanley, N., & Hindmarch, I. (1998). The effects of cigarette smoking on overnight performance. Psychopharmacology, 136(2), 172-8.
- Peyrin, L., Pequignot, J.M., Lacour, J.R., & Fourcade, J. (1987). Relations between catecholamines or 3-methoxy 4-hydroxy phenylglycol changes and the mental performance under submax exercise in men. Psychopharmacology, 93, 188-192.
- Polich, J., & Kok, A. (1995). Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. Biological Psychology, 41(2), 103-46
- Popper, K.R. (1959-1973). La logique de la découverte scientifique [Traduit de l'anglais par Thyssen-Rutten, N., & Devaux, P.]. Paris : Editions Payot.
- Possamai, C.A., Burle, B., Osmo, A., & Hasbroucq, T. (2002). Partial advance information, number of alternatives, and motor processes: An electromyographic study. Acta Psychologica, 111(1), 125-39.
- Pott, F., Jensen, K., Hansen, H., Christensen, N.J., Lassen, N.A., & Secher, N.H. (1996). Middle cerebral artery blood velocity and plasma catecholamines during exercise. Acta Physiologica Scandinavica, 158, 349-356.
- Préfault, C., & Mercier, J. (1993). Les seuils ventilatoires, méthode non invasive d'estimation des seuils lactiques. Science & Sports, 8, 217-220.
- Pribram, K.H., & McGuinness, D. (1975). Arousal, activation, and effort in the control of attention. Psychological Review, 82(2), 116-49.
- Radosevich, P.M., Nash, J.A., Lacy, D.B., O'Donovan, C., Williams, P.E., & Abumrad, N.N.

- (1989). Effects of low- and high-intensity exercise on plasma and cerebrospinal fluid levels of ir-beta-endorphin, ACTH, cortisol, norepinephrine and glucose in the conscious dog. Brain Research, 498(1), 89-98.
- Ratcliff, R. (1979). Group Reaction time distributions and analysis of distribution statistics. Psychological Bulletin, 86(3), 446-461.
- Rihet, P., Hasbroucq, T., Blin, O., & Possamaï, C.A. (1999). Serotonin and human information processing: an electromyographic study of the effects of fluvoxamine on choice reaction time. Neuroscience Letter, 265(2), 143-6.
- Rihet, P., Possamaï, C.A., Micallef-Roll, J., Blin, O., & Hasbroucq, T. (2002). Dopamine and human information processing: a reaction-time analysis of the effect of levodopa in healthy subjects. Psychopharmacology, 163(1), 62-7.
- Robbins, T.W. (1997). Arousal systems and attentional processes. Biological Psychology, 45(1-3), 57-71.
- Rohrbaugh, J.W., Stapleton, J.M., Parasuraman, R., Zubovic, E.A., Frowein, H.W., Varner, J.L., Adinoff, B., Lane, E.A., Eckardt, M.J., & Linnoila, M. (1987). Dose-related effects of ethanol on visual sustained attention and event-related potentials. Alcohol, 4(4), 293-300.
- Rowell, L.B., Brengelmann, G.L., & Freund, P.R. (1987). Unaltered norepinephrine-heart rate relationship in exercise with exogenous heat. Journal of Applied Physiology, 62(2), 646-50.
- Sanders, A.F. (1980). Stage analysis of reaction process. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), Tutorials in motor behavior. (pp. 331-354). Amsterdam: North-Holland Publishers.
- Sanders, A.F. (1983). Towards a model of stress and human performance. Acta Psychologica, 53(1), 61-97.
- Sanders, A.F. (1990). Issues and trends in the debate on discrete vs. Continuous processing of information. Acta Psychologica, 74, 123-167.
- Sanders, A.F. (1998). Elements of human performance: Reaction processes and attention in human skill. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Smid, H.G., Mulder, G., & Mulder, L.J. (1990). Selective response activation can begin before stimulus recognition is complete: a psychophysiological and error analysis of continuous flow. Acta Psychologica, 74(2-3), 169-201.
- Smith, J.M., & Misiak, H. (1976). Critical Flicker Frequency (CFF) and Psychotropic drugs in normal human subjects - A Review*. Psychopharmacology, 47, 175-182.
- Smulders, F.T. (1993). The selectivity of age effects on information processing. Mémoire de thèse, Université d'Amsterdam.

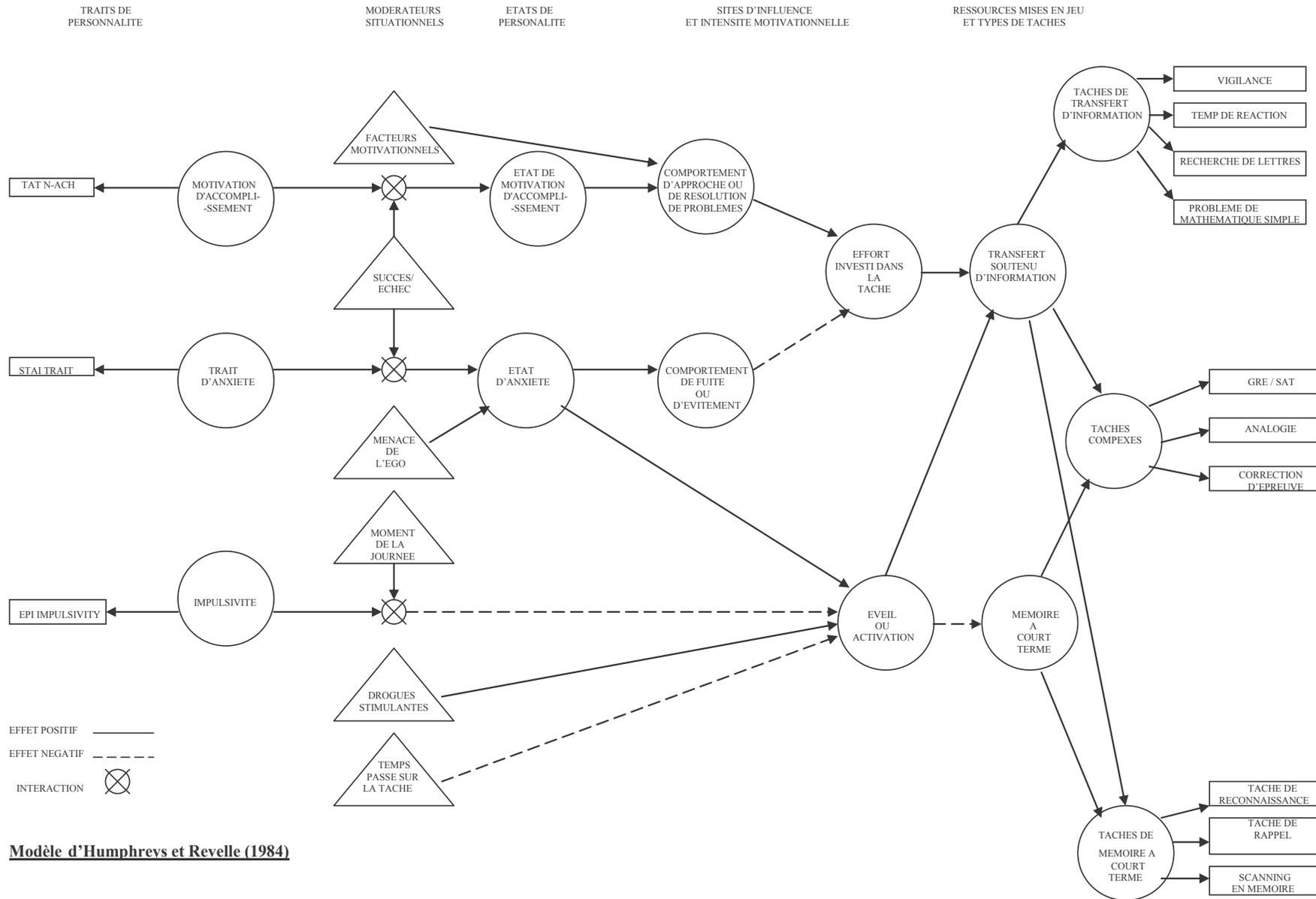
- Smulders, F.T., Kenemans, J.L., Jonkman, L.M., & Kok, A. (1997). The effects of sleep loss on task performance and the electroencephalogram in young and elderly subjects. Biological Psychology, 45(1-3), 217-39.
- Smulders, F.T., & van der Molen, M.W. (2001). Exhaustive additivity suggests a new stage not an alternative model: A commentary on Fowler, Hofer and Lipitkas (2000). Biological Psychology, 55(3), 227-37.
- Spieler, D.H., Balota, D.A., & Faust, M.E. (2000). Levels of selective attention revealed through analyses of response time distributions. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 26(2), 506-26.
- Spijkers, W.A.C., & Walter, A. (1985). Response processing stages in choice reactions. Acta Psychologica, 58(2), 191-204.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: extensions of Donders' method. Acta Psychologica, 30, 276-315.
- Sternberg, S. (2001). Separate modifiability, mental modules, and the use of pure and composite measures to reveal them. Acta Psychologica, 106(1-2), 147-246.
- Taylor, D.H. (1966). Latency components in two-choice responding. Journal of Experimental Psychology, 72, 481-87.
- Tomporowski, P.D. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. Acta Psychologica, 112(3), 297-324.
- Tomporowski, P.D., & Ellis, N.R. (1986). Effects of exercise on cognitive processes: A review. Psychological Bulletin, 99(3), 338-346.
- Travlos, A.K., Montgomery, D.L., Marisi, D.O., Koziris, P., Papathanasopoulou, K., & Kaczynski, M. (1992). The effects of two exercise protocols on information processing. In INST CNRS 2000.
- Ulrich, R., & Wing, A.M. (1991). A recruitment theory of force-time relations in the production of brief force pulses: the parallel force unit model. Psychological Review, 98(2), 268-94.
- Vallerand, R.J. (1989). Vers une méthodologie de validation transculturelle de questionnaires psychologiques: Implications pour la recherche en langue française. Canadian Psychology, 30(4), 662-680.
- Vallerand, R.J., & Halliwell, W.R. (1983). Vers une méthodologie de validation transculturelle de questionnaires psychologiques: Implications pour la psychologie du sport. Canadian Journal of Applied Sport Sciences, 8(1), 9-18.
- Vallier, J.M., Bigard, A.X., Carré, F., Eclache, J.P., & Mercier, J. (2000). Determination of lactic and ventilatory thresholds. Position of the Société Française de Médecine du Sport (French Sports Medicine Society): Détermination des seuils lactiques et ventilatoires.

- Position de la Societe francaise de médecine du sport. Science & Sports, 15(3), 133-140.
- Van Boxtel, G.J., Geraats, L.H., Van den Berg-Lenssen, M.M., & Brunia, C.H. (1993). Detection of EMG onset in ERP research. Psychophysiology, 30(4), 405-12.
- Van der Molen, M.W., Bashore, T.R., Halliday, R. & Callaway, E. (1991). Chronopsychophysiology: Mental chronometry augmented by psychophysiological time markers. In: Jennings, J.R. & Coles, M.G.H. (eds), Handbook of cognitive psychophysiology: Central and autonomic nervous system approaches (pp. 9-178). Chichester: Wiley.
- Van Zandt, T. (2000). How to fit a response time distribution. Psychonomic bulletin & review, 7(3), 424-65.
- Verleger, R. (1997). On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. Psychophysiology, 34(2), 131-56.
- Vincent, S.B. (1912). The function of the vibrossae in the behavior of the white rat. Behavioral Monograph, 1.
- Wasserman, K., & Mac Ilroy, M.B. (1964). Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. American Journal of Cardiology, 14, 844-852.
- Wasserman, K., Whipp, B.J., Koyal, S.N., & Beaver, W.L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. Journal of Applied Physiology, 35(2), 236-243.
- Weiss, A.D. (1965). The locus of reaction time change with set, motivation, and age. Journal of Gerontology, 20, 60-64.
- Winer, B.J. (1970). Statistical principles in experimental design. New-York: Mc Graw-Hill Book Compagny.
- Yagi, Y., Coburn, K.L., Estes, K.M., & Arruda, J.E. (1999). Effects of aerobic exercise and gender on visual and auditory P300, reaction time, and accuracy. European Journal of Applied Physiology and Occupational physiology, 80(5), 402-408.
- Zoladz, J.A., & Korzeniewski, B. (2001). Physiological background of the change point in VO₂ and the slow component of oxygen uptake kinetics. Journal of Physiology and Pharmacology, 52(2), 167-84.

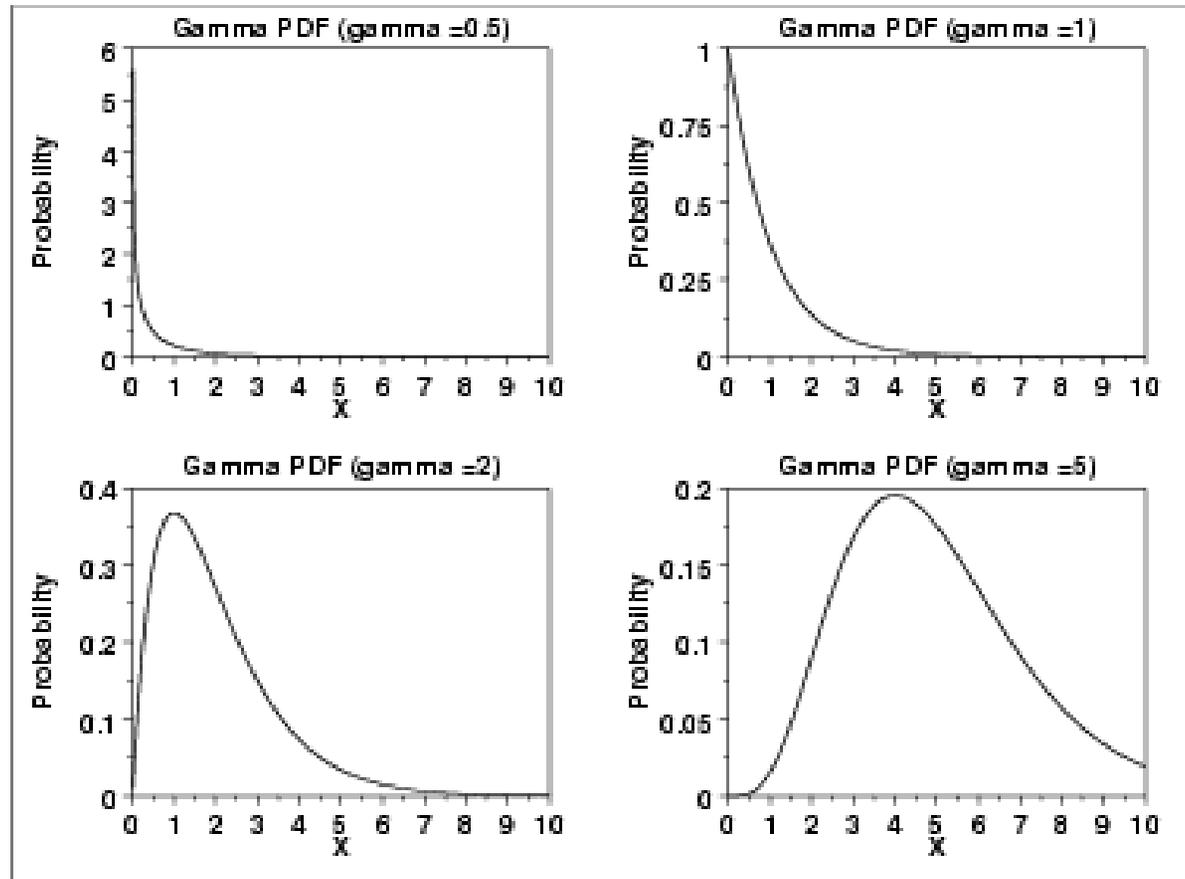
ANNEXE

ANNEXE PARTIE THEORIQUE	p. 178
Annexe 1 : Modèle d'Humphreys & Revelle (1984)	p. 179
Annexe 2 : Fonctions de probabilité théorique (Fonctions Gamma, Lognormale et Weibull)	p. 180
ANNEXE EXPERIENCE 1	p. 183
Annexe 1 : Caractéristiques de la population d'étude de l'expérience 1	p. 184
Annexe 2 : Profile Of Mood States version française (Cayrou S., Dickès P. et al., 1999)	p. 185
Annexe 3 : Echelle visuelle analogique 16-100mm version française	p. 187
Annexe 4 : Echelle de cotation DP-15 d'évaluation de la difficulté perçue	p. 188
Annexe 5 : Feuille de consentement	p.189
Annexe 6 : Contre-balancement des séries de temps de réaction en fonction de la manipulation des différents facteurs cognitifs	p. 190
ANNEXE EXPERIENCE 2	p. 191
Annexe 1 : Caractéristiques de la population d'étude de l'expérience 2	p. 192
Annexe 2 : Contre-balancement des conditions expérimentales (Fréquence critique de fusion (a) et Intensité de l'exercice (b))	p. 193
ANNEXE EXPERIENCE 3	p. 194
Annexe 1 : Caractéristiques de la population d'étude de l'expérience 3	p. 195
Annexe 2 : Contre-balancement des conditions expérimentales	p. 196
ANNEXE EXPERIENCE 4	p. 197
Annexe 1 : Caractéristiques de la population d'étude de l'expérience 4	p. 198
Annexe 2 : Contre-balancement des conditions expérimentales	p. 199

ANNEXE PARTIE THEORIQUE



Modèle d'Humphreys et Revelle (1984)

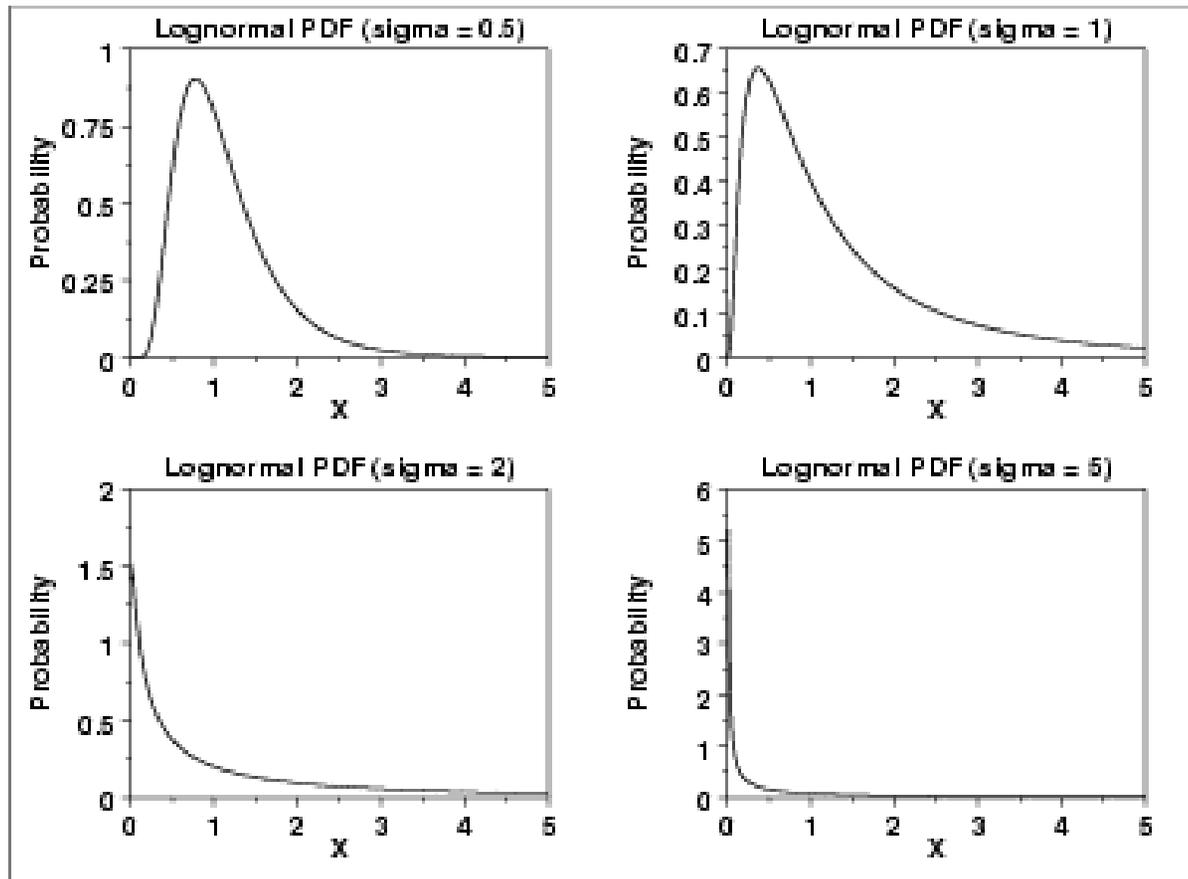


The general formula for the probability density function of the gamma distribution is

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{x-\mu}{\beta}\right)}{\beta\Gamma(\gamma)} \quad x \geq \mu; \gamma, \beta > 0$$

where γ is the shape parameter, μ is the location parameter, β is the scale parameter, and Γ is the gamma function which has the formula

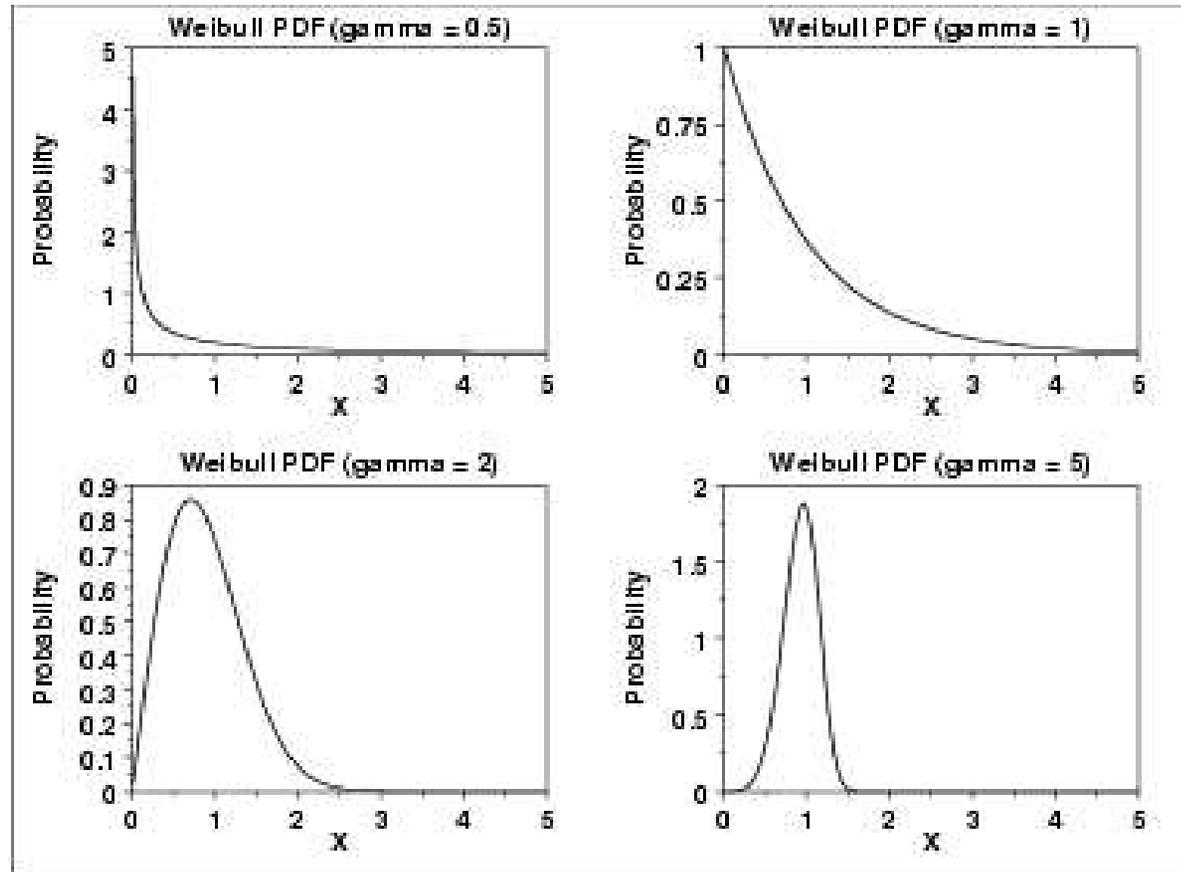
$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$$



The general formula for the probability density function of the lognormal distribution is

$$f(x) = \frac{e^{-\ln((x-\theta)/m)^2/(2\sigma^2)}}{(x-\theta)\sigma\sqrt{2\pi}} \quad x \geq \theta; m, \sigma > 0$$

where σ is the shape parameter, θ is the location parameter and m is the scale parameter.



The formula for the probability density function of the general Weibull distribution is

$$f(x) = \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{x - \mu}{\alpha} \right)^{\gamma-1} \exp \left(- \left(\frac{x - \mu}{\alpha} \right)^\gamma \right) \quad x \geq \mu; \gamma, \alpha > 0$$

where γ is the shape parameter, μ is the location parameter and is the α scale parameter.

ANNEXE EXPERIENCE 1

	Sexe	Specialité sportive	Niveau de pratique	Latéralité	Nicotine (Score FNTD)	Cafféine (mg/jour)	Quantité de pratique (nbr/sem)	Age (année)	FC Repos (bat/min)	FCmax (bat/min)	VO2max (ml.min-1.kg-1)	Pmax (watts)	20% Pmax (watts)	50% Pmax (watts)	Seuil Ventilatoire (watts)
1	Féminin	Hand-Ball	Division 2	Droitier	0 / 10	300	6	28	54	172	42,1	225	45	113	125
2	Féminin	Hand-Ball	Division 2	Droitier	Non fumeur	54	6	23	69	180	51,2	250	50	125	125
3	Féminin	Hand-Ball	Division 2	Droitier	Non fumeur	148	7	24	69	180	46,8	225	45	113	160
4	Féminin	Hand-Ball	National 2	Droitier	0 /10	296	3	24	64	179	39,8	200	40	100	125
5	Féminin	Hand-Ball	National 2	Droitier	Non fumeur	24	5	22	60	194	47,4	240	48	120	150
6	Féminin	Tennis, Football	15,4	Droitier	Non fumeur	24	6	22	74	201	38,4	175	35	88	101
7	Féminin	Tennis	15,1	Droitier	02 10	74	2	19	84	192	40,4	275	55	138	161
8	Masculin	Hand-Ball	Régional	Droitier	Non fumeur	202	4	24	52	191	61,9	300	60	150	125 *
9	Masculin	Hand-Ball	National 2	Droitier	0 / 10	148	5	21	49	192	50,7	325	65	163	226
10	Masculin	Hand-Ball	National 2	Gaucher	Non fumeur	148	5	20	53	186	50,2	325	65	163	151 *
11	Masculin	Basket-Ball	National 2	Droitier	Non fumeur	54	5	22	69	180	56	350	70	175	186
12	Masculin	Hand-Ball	National 2	Droitier	Non fumeur	0	5	25	51	173	43,7	300	60	150	146 *
13	Masculin	Basket-Ball	National 2	Droitier	0 / 10	102	5	20	56	/	48,6	300	60	150	130 *
14	Masculin	Football	Régional	Gaucher	Non fumeur	148	2	26	70	191	53,6	325	65	163	125 *
15	Masculin	Hand-Ball	National 2	Droitier	Non fumeur	74	5	20	64	196	43,8	300	60	150	151
16	Masculin	Football	Départemental	Droitier	Non fumeur	222	3	25	55	186	49,3	375	75	188	177 *
Moyenne						126,13	4,63	22,81	62,06	186,20	47,74	280,63	56,13	140,31	151,00
Ecart type						92,79	1,45	2,51	9,90	8,59	6,33	56,33	11,27	28,16	35,84

* seuil inférieur à 50 % PMA

La liste de mots suivante décrit des sentiments ou des états que les gens éprouvent. Lisez attentivement chaque mot et entourez le chiffre qui correspond le mieux aux sentiments que vous éprouvez dans l'instant présent. Les chiffres correspondent à l'échelle suivante :

0= Pas du tout 1=Un peu 2=Modérément 3= Beaucoup 4= Extrêmement

Merci de répondre pour tous les mots.

1- Amical	0	1	2	3	4	33- Plein de ressentiment	0	1	2	3	4
2- Tendu	0	1	2	3	4	34- Nerveux	0	1	2	3	4
3- En colère	0	1	2	3	4	35- Seul	0	1	2	3	4
4- Lessivé	0	1	2	3	4	36- Minable	0	1	2	3	4
5- Malheureux	0	1	2	3	4	37- La pensée embrouillée	0	1	2	3	4
6- Les idées claires	0	1	2	3	4	38- Joyeux	0	1	2	3	4
7- Plein de vie	0	1	2	3	4	39- Amer	0	1	2	3	4
8- Confus	0	1	2	3	4	40- Épuisé	0	1	2	3	4
9- Plein de regrets	0	1	2	3	4	41- Anxieux	0	1	2	3	4
10- Manque de confiance	0	1	2	3	4	42- Combatif	0	1	2	3	4
11- Apathique	0	1	2	3	4	43- Aimable	0	1	2	3	4
12- Irrité	0	1	2	3	4	44- Lugubre	0	1	2	3	4
13- Attentionné vis à vis d'autrui	0	1	2	3	4	45- Désespéré	0	1	2	3	4
14- Triste	0	1	2	3	4	46- Léthargique	0	1	2	3	4
15- Actif	0	1	2	3	4	47- Révolté	0	1	2	3	4
16- Enervé	0	1	2	3	4	48- Impuissant	0	1	2	3	4
17- Grognon	0	1	2	3	4	49- Las	0	1	2	3	4
18- Cafardeux	0	1	2	3	4	50- Perplexe	0	1	2	3	4
19- Énergique	0	1	2	3	4	51- Alerte	0	1	2	3	4
20- Paniqué	0	1	2	3	4	52- Trompé	0	1	2	3	4
21- Sans espoir	0	1	2	3	4	53- Furieux	0	1	2	3	4
22- Détendu	0	1	2	3	4	54- Efficace	0	1	2	3	4
23- Indigne	0	1	2	3	4	55- Confiant	0	1	2	3	4
24- Rancunier	0	1	2	3	4	56- Plein d'énergie	0	1	2	3	4
25- Compréhensif	0	1	2	3	4	57- De mauvaise humeur	0	1	2	3	4
26- Mal à l'aise	0	1	2	3	4	58- Sans valeur	0	1	2	3	4
27- Agité	0	1	2	3	4	59- Négligent	0	1	2	3	4
28- Incapable de concentration	0	1	2	3	4	60- Insouciant	0	1	2	3	4
29- Fatigué	0	1	2	3	4	61- Terrifié	0	1	2	3	4
30- Aidant	0	1	2	3	4	62- Coupable	0	1	2	3	4
31- Contrarié	0	1	2	3	4	63- Vigoureux	0	1	2	3	4
32- Découragé	0	1	2	3	4	64- Hésitant	0	1	2	3	4
						65- Exténué	0	1	2	3	4

Tableau récapitulatif des items composant chacune des différentes sous-échelles

Sous-échelles	Items	Nombre d'items	Etendue des scores
Anxiété-tension (ANX)	2, 10, 16, 20, 22, 26, 27, 34, 41	9	0-36
Colère-hostilité (COL)	3, 12, 17, 24, 31, 33, 39, 42, 47, 52, 53, 57	12	0-48
Confusion-perplexité (CONF)	8, 28, 37, 50, 54, 59, 64	7	0-28
Dépression-découragement (DEP)	5, 9, 14, 18, 21, 23, 32, 35, 36, 44, 45, 48, 58, 61, 62	15	0-60
Fatigue-inertie (FAT)	4, 11, 29, 40, 46, 49, 65	7	0-28
Vigueur-activité (VIG)	7, 15, 19, 38, 51, 56, 60, 63	8	0-32
Relations interpersonnelles (REL)	1, 6, 13, 25, 30, 43, 55	7	0-28
Score Global (ScG)	(Anx+Col+Conf+Dep+Fat) - Vig	(50) - 8	-32 - 200

Estimez la manière dont vous vous sentez selon les termes énumérés ci-dessous
 Considérez chaque ligne comme représentant l'étendue maximale de chaque dimension
 Évaluez vos sensations telles qu'elles sont en ce moment
 Marquez clairement cet état d'un trait perpendiculaire sur chaque ligne

Eveillé	_____	Somnolent
Calme	_____	Excité
Fort	_____	Faible
Confus	_____	Lucide
Coordonné	_____	Maladroit
Léthargique	_____	Energique
Satisfait	_____	Insatisfait
Soucieux	_____	Tranquille
Lent d'esprit	_____	Vif d'esprit
Tendu	_____	Détendu
Attentif	_____	Rêveur
Incompétent	_____	Compétent
Heureux	_____	Triste
Antagonique	_____	Amical
Intéressé	_____	Qui s'ennui
Renfermé	_____	Grégaire

Antagonique

adj. Contradictoire, en opposition. Des positions, des points de vue antagoniques.

Grégaire

adj.

1. Se dit des individus d'une population animale qui ont tendance à se grouper.
2. (Souvent péj.) Qui illustre le besoin des hommes de se grouper. Instinct grégaire. Esprit grégaire, qui pousse un individu à se fondre dans un groupe et à en accepter le comportement avec docilité.

Selon vous, à quel niveau de difficulté se situe la tâche demandée dans cette expérience ?

Entourez le score correspondant (nombre de 1 à 15).

1	
2	Tâche extrêmement facile
3	
4	Tâche très facile
5	
6	Tâche facile
7	
8	Tâche moyenne
9	
10	Tâche un peu difficile
11	
12	Tâche difficile
13	
14	Tâche extrêmement difficile
15	

Titre du projet :

Etude de l'effet de facilitation des performances cognitives induit par la réalisation d'un exercice physique d'intensité sous-maximale.

Laboratoire :

LAPMH (EA 2253)

Expérimentateurs :

K. Davranche, M. Audiffren

Je, soussigné(e) _____, me porte volontaire pour participer à une étude s'intéressant aux effets de l'exercice physique sur les processus de prises de décision.

Je comprends pleinement ce qui m'est demandé en prenant part à cette étude et certifie que les détails de cette étude m'ont été pleinement expliqués et décrits.

Je comprends également que les renseignements que j'ai fournis aux expérimentateurs resteront confidentiels et que mon anonymat sera préservé lors de toute communication relative à cette étude.

Je comprends que je peux choisir de me retirer à tout instant de cette étude sans autre conséquence.

Le

à

Signature

Sujet	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3	Séquence 4	Séquence 5	Séquence 6	Séquence 7	Séquence 8
1	S I PPC	S I PPL	S D PPC	S D PPL	C I PPC	C I PPL	C D PPC	C D PPL
2	S I PPL	S I PPC	S D PPL	S D PPC	C I PPL	C I PPC	C D PPL	C D PPC
3	S D PPC	S D PPL	S I PPC	S I PPL	C D PPC	C D PPL	C I PPC	C I PPL
4	S D PPL	S D PPC	S I PPL	S I PPC	C D PPL	C D PPC	C I PPL	C I PPC
5	C I PPC	C I PPL	C D PPC	C D PPL	S I PPC	S I PPL	S D PPC	S D PPL
6	C I PPL	C I PPC	C D PPL	C D PPC	S I PPL	S I PPC	S D PPL	S D PPC
7	C D PPC	C D PPL	C I PPC	C I PPL	S D PPC	S D PPL	S I PPC	S I PPL
8	C D PPL	C D PPC	C I PPL	C I PPC	S D PPL	S D PPC	S I PPL	S I PPC
9	S I PPC	S I PPL	S D PPC	S D PPL	C I PPC	C I PPL	C D PPC	C D PPL
10	S I PPL	S I PPC	S D PPL	S D PPC	C I PPL	C I PPC	C D PPL	C D PPC
11	S D PPC	S D PPL	S I PPC	S I PPL	C D PPC	C D PPL	C I PPC	C I PPL
12	S D PPL	S D PPC	S I PPL	S I PPC	C D PPL	C D PPC	C I PPL	C I PPC
13	C I PPC	C I PPL	C D PPC	C D PPL	S I PPC	S I PPL	S D PPC	S D PPL
14	C I PPL	C I PPC	C D PPL	C D PPC	S I PPL	S I PPC	S D PPL	S D PPC
15	C D PPC	C D PPL	C I PPC	C I PPL	S D PPC	S D PPL	S I PPC	S I PPL
16	C D PPL	C D PPC	C I PPL	C I PPC	S D PPL	S D PPC	S I PPL	S I PPC

Note.

Compatibilité stimulus-réponse : règle simple (S) versus complexe (C)

Qualité du signal : signal intact (I) versus dégradé (D)

Incertitude événementielle : durée de la période préparatoire courte de 500 msec (PPC) versus longue de 5000 msec (PPL).

ANNEXE EXPERIENCE 2

	Sexe	Specialité sportive	Niveau de pratique	Latéralité	Quantité de pratique (nbr/sem)	Age (année)	FC Repos (bat/min)	FCmax (bat/min)	VO2max (ml.min-1.kg-1)	Pmax (watts)	Seuil Ventilatoire (SV) (watts)	90% SV (watts)
Sujet 1	Féminin	Hand-Ball / Squatch	National 2	Droitier	3	24	64	179	38	200	125	113
Sujet 2	Féminin	Hand-Ball	National 2	Droitier	5	22	60	194	47	240	150	135
Sujet 3	Féminin	Tennis	15/3	Droitier	3	21	82	170	33	200	160	144
Sujet 4	Féminin	Tennis	15/1	Droitier	2	19	84	192	40	275	160	144
Sujet 5	Masculin	Hand-Ball	National 2	Droitier	5	21	49	192	51	325	200	180
Sujet 6	Masculin	Voley	/	Droitier	7	28	60	183	46	300	125	113
Sujet 7	Masculin	Boxe Française	National	Droitier	7	32	54	189	48	375	175	158
Sujet 8	Masculin	Water-Polo	National 1	Gaucher	7	25	68	183	49	350	200	180
Sujet 9	Masculin	Football	Régional	Gaucher	2	26	70	191	54	325	125	113
Sujet 10	Masculin	Hand-Ball	National 2	Droitier	5	20	64	196	41	300	150	135
Sujet 11	Masculin	Football	Départemental	Droitier	3	25	55	186	49	375	185	167
					Moyenne	4	24	65	45	297	160	144
					Ecart type	2	4	11	6	63	28	25

- a) Contrebalancement des deux fréquences d'incrémentation des diodes lumineuses au cours du test de Fréquence Critique de Fusion.

	Série 1	Série 2
Sujet 1	2 hertz	4 hertz
Sujet 2	2 hertz	4 hertz
Sujet 3	2 hertz	4 hertz
Sujet 4	4 hertz	2 hertz
Sujet 5	4 hertz	2 hertz
Sujet 6	4 hertz	2 hertz
Sujet 7	2 hertz	4 hertz
Sujet 8	2 hertz	4 hertz
Sujet 9	2 hertz	4 hertz
Sujet 10	4 hertz	2 hertz
Sujet 11	4 hertz	2 hertz

- b) Contrebalancement des deux intensités d'exercice en cours de la session expérimentale.

	Bloc 1	Bloc 2
Sujet 1	Repos	90 % SV
Sujet 2	Repos	90 % SV
Sujet 3	Repos	90 % SV
Sujet 4	Repos	90 % SV
Sujet 5	Repos	90 % SV
Sujet 6	Repos	90 % SV
Sujet 7	90 % SV	Repos
Sujet 8	90 % SV	Repos
Sujet 9	90 % SV	Repos
Sujet 10	90 % SV	Repos
Sujet 11	90 % SV	Repos

ANNEXE EXPERIENCE 3

Specialité sportive	Niveau de pratique	Latéralité	Quantité de pratique (nbr/sem)	Age (année)	FC Repos (bat/min)	FCmax (bat/min)	VO2max (ml.min-1.kg-1)	PMA (watts)	50% PMA (watts)	Seuil Ventilatoire (watts)
Hand-Ball / Squatch	National 2	Droitier	3	26	60	179	40	200	100	125
Tennis	15/3	Droitier	3	22	82	169	30	200	100	100
Hand-Ball	Régional	Droitier	3	27	70	/	37	250	125	125
Volley-Ball	National	Droitier	6	22	51	/	34	225	113	125
Football	Régional	Droitier	4	26	44	182	44	200	100	100
Judo / Boxe	National	Droitier	3	29	60	195	42	200	100	100
Hand-Ball	Régional	Droitier	4	25	52	191	55	300	150	150
Boxe Française	National	Droitier	7	32	57	170	51	350	175	175
Water-Polo	National 1	Gaucher	7	26	59	180	48	350	175	200
Taekwondo / Boxe	Régional	Droitier	6	24	60	200	48	325	163	175
Volley-Ball	/	Droitier	7	35	47	176	43	275	138	150
Football	Régional	Gaucher	2	26	70	191	52	350	175	175
		Moyenne	5	27	59	183	44	269	134	142
		Ecart type	2	4	11	11	8	64	32	34

	Bloc 1	Bloc 2
Sujet 1	Repos	50 % PMA
Sujet 3	Repos	50 % PMA
Sujet 5	Repos	50 % PMA
Sujet 7	Repos	50 % PMA
Sujet 9	Repos	50 % PMA
Sujet 2	50 % PMA	Repos
Sujet 4	50 % PMA	Repos
Sujet 6	50 % PMA	Repos
Sujet 8	50 % PMA	Repos
Sujet 10	50 % PMA	Repos
Sujet 11	50 % PMA	Repos
Sujet 12	50 % PMA	Repos

ANNEXE EXPERIENCE 4

	Sexe	Specialité sportive	Niveau de pratique	Latéralité	Quantité de pratique (nbr/sem)	Age (année)	FC Repos (bat/min)	FCmax (bat/min)	VO2max (ml.min-1.kg-1)	PMA (watts)	50% PMA (watts)	Seuil Ventilatoire (watts)
Sujet 1	Féminin	Hand-Ball / Squatch	National 2	Droitier	3	26	60	179	40	200	100	125
Sujet 2	Féminin	Tennis	15/3	Droitier	3	22	82	169	30	200	100	100
Sujet 3	Féminin	Hand-Ball	Régional	Droitier	3	27	70	/	37	250	125	125
Sujet 4	Féminin	Volley-Ball	National	Droitier	6	22	51	/	34	225	113	125
Sujet 5	Féminin	Football	Régional	Droitier	4	26	44	182	44	200	100	100
Sujet 6	Féminin	Judo / Boxe	National	Droitier	3	29	60	195	42	200	100	100
Sujet 7	Masculin	Hand-Ball	Régional	Droitier	4	25	52	191	55	300	150	150
Sujet 8	Masculin	Volley-Ball	/	Droitier	7	50	61	180	44	300	150	150
Sujet 9	Masculin	Water-Polo	National 1	Gaucher	7	26	59	180	48	350	175	200
Sujet 10	Masculin	Taekwondo / Boxe	Régional	Droitier	6	24	60	200	48	325	163	175
Sujet 11	Masculin	Volley-Ball	/	Droitier	7	35	47	176	43	275	138	150
Sujet 12	Masculin	Football	Régional	Gaucher	2	26	70	191	52	350	175	175
				Moyenne	5	28	60	184	43	265	132	140
				Ecart type	2	8	11	10	7	60	30	33

	Bloc 1	Bloc 2
Sujet 3	Repos	50 % PMA
Sujet 4	Repos	50 % PMA
Sujet 5	Repos	50 % PMA
Sujet 8	Repos	50 % PMA
Sujet 11	Repos	50 % PMA
Sujet 12	Repos	50 % PMA
Sujet 1	50 % PMA	Repos
Sujet 2	50 % PMA	Repos
Sujet 6	50 % PMA	Repos
Sujet 7	50 % PMA	Repos
Sujet 9	50 % PMA	Repos
Sujet 10	50 % PMA	Repos

Etude et localisation de l'effet de facilitation induit par un exercice physique sous-maximal au niveau de la chaîne de traitement de l'information sensorimotrice

L'objectif de ce travail de recherche est de contribuer à l'avancée des connaissances scientifiques, d'une part en précisant la nature de l'effet de l'exercice sur les performances cognitives, et d'autre part en localisant son influence au niveau de la chaîne de traitement de l'information.

Le but de la première expérience était de localiser l'effet de facilitation par l'intermédiaire de la Méthode des Facteurs Additifs de Sternberg (1969). Malgré l'observation d'un effet de facilitation, l'absence d'interactions entre les différents facteurs expérimentaux ne nous a pas permis de localiser cet effet.

La deuxième expérience a été mise en place afin de préciser la nature de l'effet de l'exercice. Il ressort de ce travail que l'amélioration des performances résulte d'un décalage de l'ensemble de la distribution de temps de réaction. L'augmentation de l'amplitude de l'effet avec le temps passé sur la tâche suggère également que l'effet de l'exercice est de nature énergétique.

Quelle que soit la complexité de la tâche cognitive, les résultats des deux dernières expériences révèlent une influence de l'exercice à la fois au niveau des processus sensoriels et des processus moteurs de traitement. L'analyse du signal électromyographique suggère une amélioration de l'efficacité de la commande cortico-spinale à l'exercice et une meilleure synchronisation des motoneurones lors du recrutement des unités motrices.

Mots clés : Chronométrie mentale, Méthode des Facteurs Additifs, Analyse de distributions, Electromyographie, Temps de réaction fractionné, Exercice physique sous-maximal.

Study and localization of the facilitating effect of sub-maximal physical exercise on information processing

The purpose of this research is to contribute to the advance of scientific knowledge of the interaction between physiological mechanisms and cognitive processes during exercise. This study aims at uncovering the exact nature of the facilitating effect of exercise on the reaction process and to locate its influence on information processing.

The goal of the first experiment is to locate the facilitating effect of exercise using the Additive Factors Method of Sternberg (1969). In spite of the improvement of cognitive performances during exercise, the lack of interactions between physiological solicitation and experimental factors does not allow us to locate this effect.

In the second experiment, the nature of the effect of the exercise is examined. Distributional analysis reveals that the improvement of the performances results from a shift of the whole distribution of reaction time. The size of the effect of exercise increases with the time spent on the task. This result suggests that the facilitating effect of exercise is energetic as regards its nature.

Whatever the complexity of the cognitive task is, the results of the two last experiments reveal that the exercise affects both the sensory and the motor processes. The analysis of the electromyographic signal suggests an improvement of the cortico-spinal efficiency during exercise and a better synchronization of the motoneurones during the recruitment of the motor units.

Keywords: Mental chronometry, Additive Factors Method, Distributional Analysis, Electromyography, Fractionated reaction time, Sub-maximal physical exercise.