

Université de Montréal

Les effets de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif de l'enfant

par

Mathilde St-Louis-Deschênes

Département de kinésiologie

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales
en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)
en sciences de l'activité physique

Août 2011

© Mathilde St-Louis-Deschênes, 2011

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Cette thèse intitulée :
Les effets de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif de l'enfant

présentée par :
Mathilde St-Louis-Deschênes

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Luc Proteau	Président-rapporteur
Dave Ellemberg	Directeur de recherche
Daniel Curnier	Membre du jury
François Trudeau	Examineur externe
Claire Chapados	Représentante du doyen

RÉSUMÉ

À tout âge, l'exercice physique peut être bénéfique au fonctionnement cognitif. Étant quotidiennement confrontés à des situations d'apprentissage, l'enfant et l'adolescent constituent une population particulièrement susceptible de profiter de ces bienfaits. Cependant, il importe de préciser et d'étudier les facteurs qui influencent la relation entre l'exercice physique et la cognition. L'objectif général de cette thèse était d'examiner, à l'aide de mesures électrophysiologiques, les effets aigus et chroniques de l'exercice physique sur les mécanismes neurophysiologiques du fonctionnement cognitif de l'enfant. Une première étude a apprécié la durée des effets aigus de l'exercice physique. Les résultats de ces travaux suggèrent qu'une séance ponctuelle d'exercice physique augmente la vigilance pendant au moins 30 min. Toujours dans un contexte d'effets aigus de l'exercice, l'impact de la demande cognitive de la tâche et de l'âge ont été examinés dans une seconde étude. Les résultats ne révèlent aucune interaction avec l'âge, cependant ils indiquent une spécificité pour les processus plus complexes du traitement de l'information. Enfin, une troisième étude a évalué l'effet de l'exercice physique chronique dans le cadre d'un programme d'activités physiques de 12 semaines. Aucun changement n'a été observé quant à l'aptitude cardiovasculaire ou la performance cognitive suite au programme. Une condition physique initialement élevée des participants pourrait expliquer ce résultat. En résumé, peu importe la condition physique de l'enfant, un exercice physique aigu d'intensité moyenne est bénéfique à la vigilance et à certains aspects du traitement cognitif de l'information. Les effets observés semblent suffisamment durables pour avoir un impact positif sur l'apprentissage en classe après une récréation ou un cours d'éducation physique.

Mots-clés : activité physique; fonctions cognitives; vigilance; ERP; EEG; P3b; Nc; N400.

ABSTRACT

Exercise can be beneficial for cognitive functioning throughout lifespan. Children and adolescents may particularly benefit from the effects of exercise on cognition as they continually face learning situations. However, it is important to identify and to study the factors that influence the relationship between exercise and cognition. The general objective of this thesis was to examine, with electrophysiological measures, the acute and chronic effects of exercise on electrophysiological mechanisms of cognitive functioning in children. A first study appreciated the duration of the acute effect of a single session of exercise. The results suggested that a single session of exercise increases vigilance for at least 30 min. Still in a context of acute exercise, the impact of the cognitive demand of the task and age were examined in a second study. Although the results did not reveal any significant interaction with age, they indicated specific benefits for the more complex cognitive processes compare to more automatic processes. Finally, a third study evaluated the effect of a 12-week program of physical activity. Following the 12-week program, no change was observed neither for the cardiovascular function nor the cognitive performance. The fact that participants already demonstrated a high level of fitness at baseline may explain this result. In conclusion, regardless of a child's fitness level, it appears that an exercise of moderate intensity improves vigilance and some aspects of information processing. The observed effects appear to last long enough to have a positive impact on classroom learning after a recess or a physical education class.

Keywords : physical activity; cognitive functions; vigilance; ERP; EEG; P3b; Nc; N400.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures.....	ix
Liste des abréviations	xi
REMERCIEMENTS.....	xii

CHAPITRE 1

INTRODUCTION	1
---------------------------	----------

CHAPITRE 2

EFFETS AIGUS DE L'EXERCICE PHYSIQUE.....	3
2.1 Milieu scolaire	4
2.2 Contexte de laboratoire	6
2.3 Modérateurs de la relation entre l'exercice physique aigu et les fonctions cognitives.....	7
2.4 Modèles théoriques.....	11
2.5 Conclusions	11

CHAPITRE 3

EFFETS CHRONIQUES DE L'EXERCICE PHYSIQUE.....	13
--	-----------

3.1 Programme d'activités physiques en milieu scolaire	13
3.2 Aptitude cardiovasculaire et fonctions cognitives (études transversales).....	20
3.3 Effets chroniques de l'activité physique et études expérimentales	25
3.4 Modérateurs de la relation entre l'exercice physique chronique et les fonctions cognitives	28
3.5 Modèles théoriques	29
3.6 Conclusions	31

CHAPITRE 4

MESURES ÉLECTROPHYSIOLOGIQUES	32
4.1 Analyse spectrale.....	32
4.2 ERP.....	33
4.2.1 P300.....	34
4.2.2 N400	39
4.3 Conclusions	44

CHAPITRE 5

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES	46
5.1 Questions de recherche et hypothèses.....	46
5.2 Article 1	48
The effect of acute exercise on brain activation in children	48
5.3 Article 2.....	62
Acute exercise and electrophysiological indices of cognition during development	62
5.4 Article 3.....	85
The effect of a physical activity program on electrophysiological indices of cognition in children.....	85

CHAPITRE 6

DISCUSSION GÉNÉRALE	129
6.1 Durée des effets aigus.....	130
6.2 L'activation physiologique induite par l'exercice physique aigu	132
6.3 Modèle de capacité d'attention de Kahneman	133
6.4 Explication neurochimique.....	137
6.5 Exercice physique et cognition : rôle de l'aptitude aérobie	138
6.7 Limites de la thèse.....	139
BIBLIOGRAPHIE	141

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.I. Résumé des études ayant apprécié l'effet d'un programme d'enseignement enrichi en éducation physique sur la réussite scolaire.	15
Tableau 3.I (suite)	16
Tableau 3.II. Résumé des études ayant apprécié l'effet d'un programme d'activités physiques en milieu scolaire sur la réussite scolaire.	18
Tableau 3.III. Résumé des études ayant apprécié l'effet de l'aptitude aérobie sur des variables comportementales et électrophysiologiques	22
Table 5.I Participants' demographic and fitness data.....	82
Table 5.II. Participants' demographic data.	116
Table 5.III. Independent t-tests for the time spent exercising in each intensity category	117
Table 5.IV. Fitness data.....	118
Table 5.V. Pearson Product-Moment correlations for exercise and cognitive variables.	119
Tableau 6.I. Caractéristiques des participants et de l'exercice physique.....	131

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1: Modulation de l'amplitude de la N400 en fonction a) de la concordance avec le contexte, b) du niveau d'association entre les mots, d) de la répétition des mots et e) de la fréquence d'utilisation des mots (tirée de (Kutas & Federmeier, 2000)).	41
Figure 5.1. Mean EEG relative power and standard error at four time points (baseline, 10, 20, and 30 min post-exercise) for a) delta, b) theta, c) alpha1 and alpha2, d) beta1 and beta2 frequency bands.....	61
Figure 5.2. Grand average ERP waveforms for the target stimulus (P3b) for 8-9 and 11-12 year-olds at centro-parietal electrodes.	83
Figure 5.3. Grand average ERP waveforms for the non target stimulus (Nc) for 8-9 and 11-12 year-olds at frontal electrodes.	84
Figure 5.4. Oddball task. Response accuracy for each stimulus category.	120
Figure 5.5. Oddball task. Response time for the target stimulus.....	121
Figure 5.6. P3b component. Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the target stimulus over the centro-parietal region.	122
Figure 5.7. Nc component. Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the non target stimulus over the frontal region.	123
Figure 5.8. Priming task. Response accuracy for each stimulus category.	124
Figure 5.9a. N400 component. Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the INCO and CONG picture-word pairs over the centro-parietal region for the control group.....	125
Figure 5.9b. N400 component. Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the INCO and CONG picture-word pairs over the centro-parietal region for the experimental group.	126

Figure 5.10a. N400diff component. Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the difference-waveform (INCO1 – INCO2) over the centro-parietal region for the control group.	127
Figure 5.10b. N400diff component. Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the difference-waveform (INCO1 – INCO2) over the centro-parietal region for the experimental group.	128
Figure 6.1. Modèle de capacité d’attention (tirée de Kahneman 1973).	134
Figure 6.2. Relation conceptuelle entre l’attribution de la capacité d’attention et la modulation de la composante P300. Les encadrés pointillés ont été ajoutés pour illustrer les effets de l’exercice physique (adaptée de Polich 2007).	136
Figure 6.3. Adaptation de la relation performance-ressource de Norman et Bobrow (1975) (tirée d’Audiffren 2009).	137

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BDNF	<i>Brain derived neurotrophic factor</i>
BMI	<i>Body mass index</i>
bpm	Battements par minute <i>Beats per minute</i>
CONG	<i>Congruent</i>
EEG	Électroencéphalogramme <i>Electroencephalogram</i>
ERP	Potentiels liés aux évènements <i>Event-related potentials</i>
FCmax	Fréquence cardiaque maximale
FCmoy	Fréquence cardiaque moyenne
HR	<i>Heart rate</i>
HRmax	<i>Maximal heart rate</i>
ICA	Analyse en composantes indépendantes <i>Independent component analysis</i>
IGF-I	<i>Insulin-like growth factor I</i>
IMC	Indice de masse corporelle
INCO	<i>Incongruent</i>
IRM	Imagerie par résonance magnétique
MAP	<i>Maximal aerobic power</i>
MRI	<i>Magnetic resonance imaging</i>
VEGF	<i>Vascular endothelial growth factor</i>
VO ₂ max	Consommation maximale d'oxygène <i>Maximal oxygen consumption</i>

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Dave ElleMBERG, qui m'a accompagné tout au long de mon parcours aux cycles supérieurs et qui a su mettre à ma disposition toutes les ressources nécessaires à la réalisation de mes projets. Je suis reconnaissante envers la confiance et la latitude que tu m'as accordée. Cela a définitivement contribué à mon épanouissement intellectuel.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mes parents qui sont de fiers et inconditionnels supporteurs. Cette fierté que vous ressentez pour moi se transcende en une énergie qui m'inspire au dépassement. L'éducation que vous m'avez offerte est un héritage dont je vous serai toujours reconnaissante.

Je ne remercierai jamais assez mon Amoureux qui, tout au long de ces cinq années, a su être une oreille attentive, un support incroyable et un motivateur hors pair. Tu es indispensable au maintien de l'équilibre dans ma vie et à mon succès. Merci pour toutes tes petites attentions.

Je désire remercier mes collègues Annie, Julien et David. Merci pour votre authenticité et votre écoute. Annie, j'ai trouvé en toi une collègue avec qui échanger autant sur la vie en générale que sur mes « théories scientifiques ». Par-dessus tout, je retiendrai les commentaires élogieux que tu as eu à l'égard de mon travail. Ils m'ont aidé à me bâtir une confiance et à croire en mes capacités.

Je remercie le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, le Fonds de recherche du Québec – Santé et la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université de Montréal pour le support financier qu'ils m'ont offert durant mes études.

Je suis également reconnaissante envers toutes les personnes qui, à un moment ou à un autre, ont contribué à la réalisation de mes projets de recherche. Je pense entre autre aux nombreux jeunes et à leurs parents qui ont accepté, avec enthousiasme et curiosité, de prendre part à mes recherches.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les bienfaits présumés de la pratique d'activités physiques¹ sur le cerveau sont l'objet de préjugés favorables dans notre société. En ce sens, on fait communément référence à une citation latine du II^e siècle : « *mens sana in corpore sano* » (un esprit sain dans un corps sain) pour justifier cette relation. Cependant, l'utilisation d'une démarche expérimentale pour tenter de comprendre les effets de l'activité physique sur le cerveau, et plus particulièrement sur les fonctions cognitives², est une approche somme toute récente. Les avantages les plus évidents sont observés pour la personne âgée chez qui l'activité physique contribue au ralentissement du déclin cognitif lié au vieillissement (ex. (Cassilhas et al., 2007; Clarkson-Smith & Hartley, 1989; Colcombe et al., 2004; Tanaka et al., 2009)). Or, chez l'enfant, déterminer les effets de l'activité physique sur le fonctionnement cognitif apparaît également un enjeu important de santé publique. Effectivement, au cours des dernières décennies, on observe une détérioration de la condition physique

¹ Activité physique : tout mouvement corporel produit par la contraction des muscles squelettiques qui provoque une élévation significative de la dépense énergétique de repos (American College of Sports Medicine, 2010).

² Il n'existe pas de définition précise de la cognition ou des fonctions cognitives. Une interprétation somme toute générale stipule que les fonctions cognitives englobent un ensemble hétérogène de fonctions intellectuelles qui concernent la connaissance. Elles incluent les processus liés à la perception, à la catégorisation, à la compréhension, à la mémoire, au langage, à la pensée, au raisonnement et à la prise de décision (Galloti, 2011; Lezak, Howieson, Loring, Hannay & Fischer, 2004). Dans le présent manuscrit, la capacité d'attention sera également considérée comme une fonction cognitive bien que cela demeure débattu (Lezak et al., 2004). Les fonctions exécutives constituent également un terme fréquemment utilisé en psychologie cognitive. Celles-ci permettent à un individu de diriger et d'adapter ses actions (ou son comportement) en fonction des contraintes de son environnement (Lezak et al., 2004). Elles réfèrent à la flexibilité cognitive, à l'inhibition, la mise à jour de la mémoire de travail (Miyake et al., 2000) ainsi qu'à la planification, à la mise en œuvre de stratégies et à la résistance à la distraction (Galloti, 2011; Lezak et al., 2004). Dans cette thèse, les fonctions exécutives seront examinées à titre d'un sous-ensemble de fonctions cognitives de haut niveau (ou « complexes »).

des jeunes (Comité scientifique de Kino-Québec, 2011). Qui plus est, l'enfance est une période critique au développement de certaines fonctions cognitives (Davidson, Amso, Anderson, & Diamond, 2006; Diamond, 2002) et les jeunes sont quotidiennement confrontés à des situations d'apprentissage. Ainsi, des connaissances plus approfondies quant au lien entre l'activité physique, le fonctionnement cognitif et les mécanismes physiologiques qui sous-tendent cette relation pourraient guider l'élaboration de politiques en santé publique et en éducation.

D'emblée, il est possible de définir deux grandes catégories d'effets de l'activité physique sur le cerveau : les effets aigus et les effets chroniques. D'une part, les effets aigus de l'activité physique sont provoqués par une séance ponctuelle d'exercice physique³. Ils induisent une modification transitoire de la performance cognitive (Audiffren, 2009). D'autre part, les effets chroniques résultent de la pratique régulière d'activités physiques et ils provoquent des changements plus durables sur la performance cognitive (Audiffren, 2009). Bref, étant donné que ces deux catégories d'effets mettent en jeu des conditions d'exercice physique et des mécanismes différents, elles seront abordées dans des chapitres distincts.

³ Exercice physique : forme d'activité physique planifiée, structurée et répétitive exécutée afin d'améliorer ou de maintenir une ou des composantes de la condition physique (American College of Sports Medicine, 2010).

CHAPITRE 2

EFFETS AIGUS DE L'EXERCICE PHYSIQUE

Revue de littérature

L'exercice physique aigu et la performance cognitive chez l'enfant et l'adolescent

Mathilde St-Louis-Deschênes^{1,2} et Dave ElleMBERG^{1,2}

¹Université de Montréal, Département de kinésiologie

²Centre de Recherche en Neuropsychologie et Cognition

Sous presse : *Science & Sports* (accepté le 17 octobre 2011)

Les effets aigus de l'exercice sur le fonctionnement cognitif de l'enfant et l'adolescent ont été examinés dans une douzaine d'études. Chaque recherche présente un ou des éléments méthodologiques distincts qui sont susceptibles d'affecter les effets de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif tels que les fonctions cognitives évaluées, l'âge des participants, la nature de l'exercice physique, sa durée et son intensité. À partir d'une revue de la littérature, je proposerai certaines lignes directrices quant aux caractéristiques de l'exercice physique (nature, durée et intensité) à utiliser pour cerner les effets aigus. Dans ce manuscrit, le terme fonctionnement cognitif sera élargi aux habiletés liées à la réussite scolaire, aux indices neurophysiologiques du fonctionnement cognitif (mesures électrophysiologiques) et, bien évidemment, à certaines fonctions cognitives précises comme la mémoire, l'inhibition et la concentration.

2.1 Milieu scolaire

Les premières études sur le sujet ont été menées en milieu scolaire. Elles avaient pour objectif de déterminer si l'éducation physique était néfaste à la performance scolaire et à la concentration des élèves. À ma connaissance, Gabbard et Barton (1979) sont les premiers auteurs à s'être penchés sur la question. Contrairement à l'hypothèse précédemment postulée, ils ont trouvé une amélioration de la capacité à résoudre des problèmes de mathématiques chez des élèves de 2^e année après 50 min d'éducation physique. Le même cours d'éducation physique, mais d'une durée de 20, 30 ou 40 min s'est toutefois avéré être sans effet. La capacité à résoudre des problèmes mathématiques a également été examinée chez des élèves de 6^e année (McNaughten & Gabbard, 1993). Cette capacité s'était améliorée après 30 et 40 min de marche selon une intensité se situant entre 120 et 145 battements par minute (bpm). Aucun changement n'a été observé après 20 min de marche. Le test a été administré environ 90 s après la fin de l'exercice physique.

Raviv et Low (1990), Caterino et Polak (1999), Budde et ses collaborateurs (2008) ont examiné la concentration des élèves suite à une séance d'exercice physique. Caterino et Polak (1999) ont trouvé qu'une séance de marche et

d'étirements de 15 min était bénéfique à la concentration des élèves de 4^e année. Toutefois, aucun effet n'a été trouvé pour les élèves de 2^e ou 3^e année. Raviv et Low (1990) ont observé que la capacité de concentration d'élèves de 11 et 12 ans était augmentée après un cours d'éducation physique. Par contre, cet effet n'était pas différent de celui d'un cours de sciences. Finalement, Budde et al. (2008) ont démontré qu'une séance d'exercice de 10 min, selon une intensité moyenne (fréquence cardiaque moyenne (FCmoy) de 122 bpm) était bénéfique à la concentration d'adolescents âgés entre 13 et 16 ans qui fréquentaient une école fortement axée sur la performance sportive. Dans cette étude, l'absence d'un groupe inactif limite l'interprétation des résultats. Toutefois, les chercheurs ont constaté que l'effet était plus grand chez les adolescents qui avaient fait des exercices de coordination comparativement à ceux qui avaient fait des exercices qui en requéraient peu.

Toujours en milieu scolaire des études récentes se sont plutôt intéressées aux effets de l'exercice physique sur la mémoire. C'est le cas de Pesce et ses collaborateurs (2009) qui ont examiné la mémoire à court terme et la mémoire à long terme chez des élèves de 11 et 12 ans qui avaient participé soit à un entraînement en circuit, soit à un sport d'équipe. Les deux types d'exercices physiques étaient de durée et d'intensité similaires, c'est-à-dire approximativement 40 min selon une FCmoy d'environ 140 bpm. Cette recherche révèle que le sport d'équipe a été bénéfique aux deux types de mémoire tandis que l'entraînement en circuit a seulement été profitable à la mémoire à long terme. Finalement, Budde et ses collègues (2010) ont observé qu'une course de 12 min selon une intensité moyenne (entre 50 et 65 % de la fréquence cardiaque maximale (FCmax)) était profitable aux adolescents qui démontraient initialement une faible capacité de mémoire de travail. L'exécution du même exercice selon une intensité plus élevée (entre 70 et 80 % de la FCmax) était cependant sans effet.

2.2 Contexte de laboratoire

Dans un contexte de laboratoire, Zervas et al. (1991) ont évalué la prise de décision chez des garçons âgés entre 11 et 14 ans. Elle a été mesurée avant et 15 min après une course sur tapis roulant de 20 min selon une FC_{moy} de 188 bpm. Des mesures identiques ont été documentées chez des garçons du même âge qui étaient demeurés assis pendant 1 h sans activité spécifique. Les résultats révèlent que l'exercice physique a eu un effet bénéfique sur la prise de décision. Similairement, Ellemberg et St-Louis-Deschênes (2010) ont montré qu'un exercice sur vélo stationnaire selon une intensité moyenne (63 % de la FC_{max}) était bénéfique aux fonctions sensori-motrices et à la prise de décision chez des garçons de 7 et 10 ans. Les travaux de Tomporowski et ses collaborateurs (2008) indiquent toutefois que la flexibilité cognitive d'enfants de 7-8 ans et de 9-11 ans est inchangée après un exercice de marche sur tapis roulant de 23 min. La passation du test cognitif a débuté entre 1 et 3 min après la fin de l'exercice physique. Il faut cependant souligner que les enfants inclus dans cette étude étaient en santé, mais que leur indice de masse corporelle (IMC) s'élevait au-delà du 85^e centile selon les normes établies pour l'âge et le sexe.

Trois études ont eu recours à l'électrophysiologie, une technique de neuro-imagerie, pour tenter de cerner les effets de l'exercice physique sur le cerveau (Hillman, Pontifex, et al., 2009; Schneider, Vogt, Frysich, Guardiera, & Struder, 2009; Stroth et al., 2009). Deux d'entre elles ont combiné la passation d'un test d'inhibition (tâche de « *flanker* » modifiée) à l'enregistrement de l'activité neurale (Hillman, Pontifex, et al., 2009; Stroth et al., 2009). Ainsi, chez les enfants de 9 ans, les résultats suggèrent qu'un exercice de marche de 20 min selon une intensité moyenne (66 % de la FC_{max}) est bénéfique à la capacité d'inhibition et s'accompagne d'une activité neurale (composante P3) de plus grande amplitude (Hillman, Pontifex, et al., 2009). Ces résultats ont été obtenus même si la passation du test a débuté 25 min après la cessation de l'exercice. Cependant, suite à un exercice sur vélo stationnaire, dont la durée et l'intensité étaient similaires (20 min à 60 % de la FC_{max}), la performance au test d'inhibition de même que l'indice neural sont demeurés

inchangés chez des adolescents de 13 et 14 ans (Stroth et al., 2009). Finalement, Schneider et collaborateurs (2009) ont examiné l'impact d'un exercice physique sur le niveau d'éveil d'enfants de 9 et 10 ans à partir de l'activité neurale spontanée du cerveau. Les résultats de cette recherche suggèrent qu'un exercice de 15 min sur vélo stationnaire induit un état de relaxation propice à l'apprentissage.

2.3 Modérateurs de la relation entre l'exercice physique aigu et les fonctions cognitives

Un exercice physique ne semble pas systématiquement induire des effets positifs sur le fonctionnement cognitif. Ainsi, certaines recherches suggèrent des effets différentiels en fonction de l'âge des participants (Caterino & Polak, 1999), de la nature (Budde et al., 2008; Pesce et al., 2009) et du volume de l'exercice physique (Budde et al., 2010; Gabbard & Barton, 1979; McNaughten & Gabbard, 1993). Bref, les prochaines sections de cette thèse auront pour objectifs de : 1) déterminer les paramètres d'exercice physique qui facilitent le fonctionnement cognitif; 2) cerner la durée des effets positifs sur le cerveau; 3) examiner les fonctions cognitives qui profitent d'un exercice physique et 4) comprendre la relation en fonction de l'âge ou du développement cognitif des participants.

Paramètres de l'activité physique

La précédente revue de littérature nous suggère qu'une seule séance d'exercice physique peut être bénéfique à certaines fonctions cognitives. Il est cependant primordial d'identifier les paramètres d'exercice physique (nature, durée et intensité) qui sont susceptibles d'optimiser cette relation. En tenant compte de toutes les études qui ont trouvé une amélioration des fonctions cognitives suite à une séance d'exercice, on constate que la durée de l'exercice physique varie entre 10 et 50 min selon une intensité moyenne à élevée. Cette fenêtre de temps et d'intensité cadre relativement bien avec celle qui avait été proposée par Tomporowski (2003) suite à une recension des écrits chez l'adulte. Il avait alors conclu que les exercices dont l'intensité était sous-maximale et dont la durée se situait entre 20 et 60 min étaient

généralement bénéfiques aux processus cognitifs. Outre ce portrait assez global, on recense, chez l'enfant, seulement deux études qui ont examiné la durée de l'exercice à titre de variable indépendante. Les conclusions sont assez équivoques. Gabbard et Barton (1979) concluent qu'un cours d'éducation physique de 50 min est bénéfique à la résolution de problèmes, mais non un cours de 20, 30 ou 40 min. Par contre, McNaughten et Gabbard suggèrent qu'un exercice de marche de 30 ou 40 min, mais pas de 20 min, est bénéfique à la résolution de problèmes. Enfin, en ce qui a trait à l'intensité d'exercice, nous n'avons documenté qu'une seule étude ayant manipulé ce facteur (Budde et al., 2010). Les conclusions de cette étude indiquent que pour un exercice de relativement courte durée (12 min), une intensité moyenne (entre 50-65 % de la FCmax) est préférable à une intensité élevée (entre 70-80 % de la FCmax). Quant à la nature de l'exercice physique, il semble que les bienfaits sont plus importants suite à des exercices requérant de la coordination (Budde et al., 2008) ou des sports collectifs (Pesce et al., 2009). Ces effets seraient attribuables à une activation cognitive lors de l'activité physique (ex. exécution de mouvements complexes, prise de décision rapide).

Durée des effets

Un autre élément pouvant influencer sur les effets de l'exercice sur le fonctionnement cognitif est le temps écoulé entre la fin de l'exercice physique et la passation du test cognitif. Il s'agit d'un facteur rarement discuté, mais dont la portée est non seulement d'ordre méthodologique, mais aussi d'ordre pratique. Certes, comprendre la durée des bienfaits et les périodes propices permettront de développer des protocoles de recherche plus rigoureux et plus facilement comparables, mais cette question de recherche pourrait également avoir des retombées concrètes en milieu scolaire. Effectivement, suite à un cours d'éducation physique ou une période de récréation, les enseignants pourraient tirer profit d'une capacité d'apprentissage accrue des élèves si les effets étaient suffisamment durables pour persister au-delà du retour en classe. À ma connaissance, aucune étude n'a examiné cette question chez l'enfant. Parmi les recherches qui ont documenté le temps écoulé entre la fin de l'exercice et la passation du test cognitif, on constate que la performance

intellectuelle a essentiellement été évaluée dans les 15 min suivant la fin de l'exercice (Gabbard & Barton, 1979; McNaughten & Gabbard, 1993; Pesce et al., 2009; Tomporowski, Davis, Lambourne, et al., 2008; Zervas et al., 1991). Seuls Hillman et collaborateurs (2009) ont rapporté une mesure effectuée 25 min après la fin de l'exercice physique.

Fonctions cognitives ciblées

À la lumière de cette revue de la littérature quant aux effets aigus de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif, il apparaît que ceux-ci se généralisent à plusieurs processus du cerveau. Effectivement, des bienfaits sont documentés autant pour des processus cognitifs rudimentaires telles les fonctions sensori-motrices que pour des processus cognitifs complexes comme les fonctions exécutives (résolution de problèmes, prise de décision, inhibition et mémoire de travail) en passant par la concentration et la mémoire. Toutefois, certaines études recensées ayant utilisé des tâches d'inhibition (Stroth et al., 2009) et de flexibilité cognitive (Tomporowski, Davis, Lambourne, et al., 2008) n'ont trouvé aucun changement du fonctionnement cognitif suite à l'exercice physique.

Si l'on désire circonscrire les effets de l'exercice physique sur le domaine cognitif, il est nécessaire d'examiner les études qui ont systématiquement cerné différentes fonctions cognitives. Parmi les quatre études qui ont examiné différents processus cognitifs, ou différentes étapes dans le traitement de l'information, on constate que l'effet de l'exercice varie peu. Pesce et ses collègues (2009) ont trouvé des effets positifs tant pour la mémoire à court terme que pour la mémoire à long terme. Cependant, la mémoire à long terme semble bénéficier de l'exercice physique seulement lorsque celui-ci met en jeu des interactions sociales et cognitives. Dans l'étude de Stroth et ses collaborateurs (2009) aucun des aspects du traitement de l'information n'a bénéficié de l'exercice (i.e. préparation à la tâche, processus d'inhibition, mise à jour de la mémoire de travail). Les travaux d'Ellemborg et St-Louis-Deschênes (2010) indiquent que l'exercice physique aigu améliore à la fois les

temps de réaction simple et les temps de réaction au choix. Par contre, la réduction des temps de réaction est deux fois plus importante pour la tâche au choix (prise de décision) que pour la tâche de temps de réaction simple. Cela suggère des effets plus grands pour les tâches cognitives complexes. En outre, Hillman et ses collaborateurs (2009) ont fait varier le niveau d'inhibition requis pour réussir avec succès la tâche de « *flanker* » modifiée. Les résultats révèlent des effets positifs de l'exercice physique plus importants lors des conditions qui requéraient un degré élevé d'inhibition. Bref, l'effet d'exercice ne semble pas spécifique à une fonction cognitive précise, mais pourrait varier en fonction de la demande cognitive de la tâche. Il semble donc pertinent de développer des protocoles de recherche qui examineront l'effet aigu d'exercice en relation avec la complexité des processus cognitifs étudiés.

Développement cognitif

On recense seulement trois études qui ont inclus différents groupes d'âge dans leur protocole de recherche. Dans tous les cas, des groupes de préadolescents ont été comparés. Pour l'instant, les résultats sont équivoques. Caterino et Polak (1999) suggèrent que des bienfaits sur la concentration de l'élève ne pourraient être induits qu'à partir de l'âge de 9 ou 10 ans. Deux autres études indiquent plutôt que l'effet d'exercice est inchangé peu importe l'âge (Ellemborg & St-Louis-Deschenes, 2010; Tomporowski, Davis, Lambourne, et al., 2008). Cependant, des revues de littérature récentes suggèrent que le développement pourrait moduler les effets de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif (Best, 2010; Tomporowski, Davis, Miller, & Naglieri, 2008). Ainsi, certains auteurs sont d'avis que les fonctions qui subissent un développement tardif, comme les fonctions exécutives (mémoire de travail, flexibilité cognitive et inhibition), seraient davantage susceptibles aux effets de l'exercice physique à cause de leur maturation inachevée (Best, 2010; Tomporowski, Davis, Miller, et al., 2008). Bref, de prochaines études devront cerner divers processus cognitifs à différentes étapes du développement intellectuel.

2.4 Modèles théoriques

La compréhension des effets aigus de l'exercice physique passe par une approche assez générale qui combine la psychologie cognitive et l'approche énergétique (Audiffren, 2009). Ainsi, certaines étapes ou certains processus du traitement de l'information seraient affectés par l'exercice physique à cause de ses effets sur le niveau d'éveil ou sur l'activation de l'organisme. Cette appréciation globale des effets aigus de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif s'intègre à de nombreux modèles théoriques de la psychologie cognitive. Par exemple, selon le modèle de Kahneman (1973), un exercice aérobic améliorerait la performance cognitive globale en augmentant la capacité d'attention disponible pour le traitement de l'information. Cependant, un exercice de très longue durée, conduisant à l'épuisement, pourrait avoir des effets délétères en réduisant cette même capacité d'attention. Le modèle de Sanders (1983), qui suggère que le niveau d'éveil et d'activation régulent les processus sensori-moteurs, permet de spéculer quant à des effets bénéfiques de l'exercice physique qui seraient circonscrits à ces processus. En outre, le modèle de Humphreys et Revelle (1984) suggère qu'une augmentation du niveau d'éveil est bénéfique à la prise de décision (ex. temps de réaction au choix), mais néfaste aux processus mis en jeu dans la mémoire à court terme. Bref, selon cette perspective un même stimulus d'exercice physique pourrait engendrer simultanément des effets positifs et néfastes sur le fonctionnement cognitif. Les modèles présentés dans cette section étant hautement spéculatifs et ne faisant l'objet d'aucun consensus, il apparaît pertinent de développer des protocoles expérimentaux qui permettront une mesure continue des processus qui se produisent entre la présentation du stimulus et l'exécution de la réponse (ex. potentiels liés aux événements) tout en variant la demande cognitive des tâches utilisées.

2.5 Conclusions

La présente recension d'écrits sur l'exercice physique aigu soulève trois éléments importants qui méritent d'être étudiés plus attentivement.

- 1) Quelle est la durée des effets aigus de l'exercice physique sur le cerveau?
- 2) Les effets aigus de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif varient-ils en fonction de la demande cognitive de la tâche?
- 3) Les bienfaits cognitifs induits par une séance d'exercice physique sont-ils modulés par l'âge des participants?

Ainsi, deux études seront incluses dans cette thèse pour tenter de répondre à ces questions. Une première étude permettra d'apprécier la durée des bienfaits de l'exercice physique (section 5.2) tandis qu'une seconde étude examinera les effets aigus de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif de l'enfant en relation avec la demande cognitive de la tâche et l'âge (section 5.3). Qui plus est, pour ces deux études, nous avons choisi de soumettre nos participants à un exercice sur vélo stationnaire pour une durée d'environ trente minutes selon une intensité moyenne. Ces paramètres ont été sélectionnés sur la base de la précédente revue de littérature en plus d'avoir été utilisés par notre laboratoire dans une étude antérieure (Elleberg & St-Louis-Deschenes, 2010).

CHAPITRE 3

EFFETS CHRONIQUES DE L'EXERCICE PHYSIQUE

L'effet de la pratique régulière d'activités physiques sur le fonctionnement cognitif de l'enfant et de l'adolescent est très peu documenté. À ma connaissance, on recense uniquement deux études qui ont examiné l'impact d'un programme d'entraînement sur des fonctions cognitives précises chez l'enfant à partir d'un protocole expérimental avec assignation aléatoire des participants et mesures pré et post-intervention (Davis et al., 2011; Kamijo et al., 2011). Dans le but d'obtenir des éléments de réponse quant aux paramètres d'activité physique qui influencent le fonctionnement cognitif de l'enfant, la présente revue de littérature sera complétée d'études ayant utilisé des approches jugées complémentaires. Ainsi, une première section sera consacrée aux recherches ayant examiné l'effet d'une augmentation de la pratique d'activités physiques dans un cadre scolaire sur la performance académique des élèves. Une seconde section sera dédiée aux études transversales ayant comparé la performance cognitive d'enfants et d'adolescents en fonction de leur condition physique. Elle permettra de cerner les fonctions cognitives associées à la condition physique. Enfin, une troisième section analysera les études dans lesquelles on a spécifiquement examiné les effets d'un programme d'activités physiques sur des fonctions cognitives précises. Globalement, cette recension d'écrits guidera l'élaboration de mon protocole de recherche quant aux effets chroniques de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif de l'enfant.

3.1 Programme d'activités physiques en milieu scolaire

On peut recenser une dizaine d'études qui ont manipulé la pratique d'activités physiques en milieu scolaire et dont les résultats permettent de spéculer quant à une amélioration possible du fonctionnement cognitif des élèves. Ces interventions consistent généralement 1) à augmenter le temps consacré à l'enseignement de l'éducation physique, 2) à entrecouper l'enseignement magistral par de brèves séances d'activité physique sous la supervision du titulaire de classe ou 3) à combiner la pratique d'une activité physique à l'enseignement de la matière. Plus souvent

qu'autrement, l'objectif primaire de ces études était d'augmenter la pratique d'activités physiques chez les élèves et d'en examiner les retombées sur des indices de la santé tels que l'IMC ou l'aptitude cardiovasculaire. Or, étant donné que ce type d'intervention entraînait généralement une réduction de l'enseignement magistral, des mesures de la performance scolaire étaient incluses afin de s'assurer que les bienfaits de l'intervention sur la santé ne se faisaient pas au détriment de la réussite scolaire. Ainsi, malgré l'absence de mesures précises des fonctions cognitives, ces études permettent d'apprécier et de discuter de la nature et de la durée d'un programme d'activités physiques auprès d'élèves du primaire ou du secondaire.

Programmes d'éducation physique

Il a été possible de documenter six études (voir Tableau 3.I) qui ont manipulé la pratique d'activités physiques en milieu scolaire par le biais d'une augmentation du volume de l'enseignement de l'éducation physique (Coe, Pivarnik, Womack, & Reeves, 2006; Dwyer, Coonan, Leitch, Hetzel, & Baghurst, 1983; Ericsson, 2008; Pollatschek & O'Hagan, 1989; Sallis et al., 1999; Shephard, Lavallée, Volle, LaBarre, & Beaucage, 1994). La majorité de ces interventions consistaient à implanter un programme quotidien d'éducation physique basé sur le développement des habiletés motrices et de la condition physique de l'enfant (Coe et al., 2006; Dwyer et al., 1983; Ericsson, 2008; Pollatschek & O'Hagan, 1989; Shephard et al., 1994). Ainsi, le volume d'éducation physique était entre 2.5 (Ericsson, 2008; Pollatschek & O'Hagan, 1989; Sallis et al., 1999) et 6.5 fois (Shephard et al., 1994) plus élevé chez les élèves des cohortes expérimentales comparativement aux élèves des cohortes témoins. Ces interventions se sont déroulées sur une période allant de 14 semaines (Dwyer et al., 1983) à 6 ans (Shephard et al., 1994). La majorité des résultats obtenus par ces recherches (17 des 26 comparaisons) indiquent que la performance aux tests standardisés des aptitudes à la réussite scolaire demeure similaire peu importe le profil d'enseignement de l'éducation physique de la cohorte (Coe et al., 2006; Dwyer et al., 1983; Pollatschek & O'Hagan, 1989; Sallis et al., 1999; Shephard et al., 1994).

Tableau 3.I. Résumé des études ayant apprécié l'effet d'un programme d'enseignement enrichi en éducation physique sur la réussite scolaire.

Auteurs	Intervention		Volume hebdomadaire d'éducation physique		Tests cognitifs	Résultats		
	Quotidienne? (oui/non)	Durée	Cohorte exp (n=)	Cohorte témoin (n=)		+	ns	-
Dwyer, Coonan, Leitch, Hetzel, & Baghurst (1983)	oui	14 sem	375 min (n = 328)	90 min (n = 135)	Aptitudes scolaires • Mathématiques : (ACER arithmetic test) • Lecture : (GAP reading test)	0	1	0
Pollatschek & O'Hagan (1989)	oui	1 an	entre 225 et 300 min (n = 222)	entre 90 et 120 min (n = 83)	Aptitudes scolaires • Mathématiques : (Staffordshire Test of Computation) • Lecture : (GAPADOL test)	0	1	0
Shephard, Lavallée, Volle, LaBarre, & Beaucage (1994)	oui	6 ans	300 min (n = 295)	45 min (n = 251)	Aptitudes scolaires (examens provinciaux) • Mathématiques : • Français : • Anglais : Moyenne scolaire générale (1 ^{ère} à 6 ^e année) Quotient Intellectuel (Wechsler Intelligence Scale for Children)	1 0 0	0 1 0	0 0 1
Sallis et al. (1999)	non	2 ans	90 min (n = 489)	38 min (n = 265)	Aptitudes scolaires (Metropolitan Achievement Tests, MAT) • Globales : • Mathématiques : • Lecture : • Langue :	1 0 2 1	3 4 2 2	0 0 0 1

Tableau 3.I (suite)

Auteurs	Intervention		Volume hebdomadaire d'éducation physique		Tests cognitifs	Résultats		
	Quotidienne? (oui/non)	Durée	Cohorte exp (n=)	Cohorte témoin (n=)		+	ns	-
Coe, Pivarnik, Womack, & Reeves (2006)	oui	6 mois	275 min (n = 214)	0 min (n = 214)	Aptitudes scolaires (<i>Terra Nova standardized test</i>)	0	1	0
Ericsson (2008)	oui	3 ans	5 cours par sem (n = 152)	2 cours par sem (n = 99)	Aptitudes scolaires (tests nationaux) • Mathématiques : • Suédois :	1 1	0 0	0 0

Notes : «+» = différence significative entre les cohortes à l'avantage du groupe expérimental; «ns» = aucune différence significative entre les cohortes; «-» = différence significative entre les cohortes à l'avantage du groupe témoin.

Il importe de préciser que l'absence de changement quant aux aptitudes scolaires dans un contexte où le temps consacré à l'enseignement magistral est réduit constitue en soi un résultat positif, car il suggère un meilleur apprentissage par unité d'enseignement (Dwyer et al., 1983; Pollatschek & O'Hagan, 1989; Sallis et al., 1999; Shephard et al., 1994). Parmi les neuf autres comparaisons en lien avec les aptitudes scolaires, sept se sont révélées à l'avantage des cohortes expérimentales (Ericsson, 2008; Sallis et al., 1999; Shephard et al., 1994) et seulement deux à l'avantage des cohortes témoins (Sallis et al., 1999; Shephard et al., 1994). Par ailleurs, l'appréciation de la moyenne scolaire générale et la performance au test de quotient intellectuel du WISC (*Wechsler Intelligence Scale for Children*) par Shephard et collaborateurs (1994), suggère des résultats académiques supérieurs pendant quatre des six années de l'intervention pour la cohorte expérimentale ainsi qu'une tendance à obtenir de meilleurs résultats au test des habiletés intellectuelles chez ce groupe.

Programmes d'activités physiques en classe

Quatre autres interventions ayant pour objectif d'augmenter la pratique d'activités physiques en milieu scolaire sont également documentées dans le Tableau 3.II (Ahamed et al., 2007; Donnelly et al., 2009; Fredericks, Kokot, & Krog, 2006; Uhrich & Swalm, 2007). Celles-ci se sont déroulées sous la supervision du titulaire de classe, soit dans les salles de cours, soit dans la cour d'école, pendant une période allant de 6 semaines (Uhrich & Swalm, 2007) à 3 ans (Donnelly et al., 2009). Les activités physiques pratiquées visaient l'amélioration des habiletés perceptivo-motrices et bi-manuelles (Fredericks et al., 2006; Uhrich & Swalm, 2007) ou l'atteinte d'un mode de vie plus actif (Ahamed et al., 2007; Donnelly et al., 2009). En bénéficiant de brèves séances d'activités supplémentaires (entre 10 et 20 min) les élèves pouvaient cumuler jusqu'à 100 min d'activités physiques par semaine. En résumé, ces études révèlent des résultats positifs autant pour la réussite scolaire générale (Ahamed et al., 2007; Donnelly et al., 2009) que pour les aptitudes en lecture (Donnelly et al., 2009; Fredericks et al., 2006; Uhrich & Swalm, 2007) ou en mathématiques (Donnelly et al., 2009; Fredericks et al., 2006).

Tableau 3.II. Résumé des études ayant apprécié l'effet d'un programme d'activités physiques en milieu scolaire sur la réussite scolaire.

Auteurs	N par cohorte		Intervention			Tests cognitifs	Résultats		
	Exp	Témoin	Nature	Durée	Volume hebdomadaire		+	ns	-
Fredericks, Kokot, & Krog (2006)	13	13	Perceptivo- et sensori-moteur	8 sem	100 min (20 min X 5 jr)	Aptitudes scolaires <ul style="list-style-type: none"> • Générales : (<i>Aptitude Test for School Beginners, ASB</i>) • Mathématiques : (<i>maths age</i>) • Lecture : (<i>reading age</i>) 	1	7	0
Ahamed et al. (2007)	214	73	Variété d'activités (ex. saut à la corde, dance, entraînement en circuit, exercices de résistance, etc.)	16 mois	75 min (15 min X 5jr)	Aptitudes scolaires (<i>Canadian Achievement Test, CAT-3</i>)	1	0	0
Uhrich & Swalm, 2007	20	21	Habiletés bi-manuelles (« <i>sport stacking</i> »)	6 sem	60 min (20 min X 3jr)	Aptitudes scolaires <ul style="list-style-type: none"> • Lecture : (<i>Gates-Mac Ginitic Reading Test, GMRT-4</i>) 	1	1	0
Donnelly et al. (2009)	117	86	Variété d'activités (intensité moyenne à élevée)	3 ans	90 min (activités de 10 min)	Aptitudes scolaires (<i>Wechsler Individual Achievement Test, WIAT-II</i>) <ul style="list-style-type: none"> • Globales : • Mathématiques : • Lecture : • Orthographe : 	1	0	0
							1	0	0
							1	0	0
							1	0	0
							1	0	0

Notes : «+» = différence significative entre les cohortes à l'avantage du groupe expérimental; «ns» = aucune différence significative entre les cohortes; «-» = différence significative entre les cohortes à l'avantage du groupe témoin.

La généralisation des résultats obtenus en milieu scolaire au fonctionnement cognitif comporte de nombreuses limites. En effet, il est difficile de conclure que le meilleur apprentissage observé dans ces études est attribuable à un effet positif de l'activité physique sur le fonctionnement cognitif, car plusieurs facteurs influent sur la réussite scolaire et un ou plusieurs d'entre eux peuvent avoir été modulés par les interventions. Par exemple, Dwyer et ses collègues (1983) observent que le maintien de la performance scolaire est concomitant à une amélioration du comportement de l'élève. Cette conclusion est supportée par Mahar et collaborateurs (2006) qui rapportent une augmentation des comportements appropriés à l'apprentissage et un plus grand respect des consignes après une brève pause active. Aussi, certains auteurs suggèrent que la réduction de l'enseignement magistral a pu être bénéfique à la qualité de l'enseignement des titulaires de classe (Sallis et al., 1999; Shephard et al., 1994). D'ailleurs, le développement d'une attitude positive à l'égard de l'intervention chez les enseignants ou les élèves apparaît également comme un facteur qu'il faut considérer (Ericsson, 2008; Shephard et al., 1994), notamment pour les études qui ont utilisé les résultats attribués par le ou la titulaire de classe (Shephard et al., 1994). Enfin, on sait que la pratique d'activités physiques peut influencer positivement de nombreuses variables psychologiques qui n'ont pas nécessairement été prises en compte dans ces études, dont l'estime de soi, le sentiment d'auto-efficacité, le concept de soi, le sentiment de compétence, la persévérance scolaire, le sentiment d'appartenance, l'humeur, l'intérêt en classe et la résilience (Centers for Disease Control and Prevention, 2010).

Une autre limite importante des interventions précédemment décrites est qu'elles ne permettent pas de dissocier les possibles effets aigus et chroniques de l'activité physique sur le fonctionnement cognitif. Effectivement, on peut penser que les cours d'éducation physique et les brèves séances d'exercice physique ont induit des effets immédiats bénéfiques à la concentration et à la mémoire. Les élèves ont ainsi pu profiter de conditions favorables à l'apprentissage dans les minutes qui ont suivi le retour en classe et, ultimement, obtenir de meilleurs résultats académiques.

Bref, les programmes d'intervention en milieu scolaire ne peuvent être discutés selon une perspective d'effets strictement chroniques.

3.2 Aptitude cardiovasculaire et fonctions cognitives (études transversales)

Les études d'intervention en milieu scolaire nous informent très peu sur les fonctions cognitives qui pourraient bénéficier de la pratique régulière d'activités physiques. Afin d'examiner cette question, certaines études récentes se sont penchées sur le lien entre la condition physique, plus spécifiquement l'aptitude cardiovasculaire, et certaines fonctions cognitives précises comme l'inhibition, la mise à jour de la mémoire de travail, la flexibilité cognitive et la mémoire associative. En plus d'évaluer la performance comportementale (temps de réaction et exactitude des réponses), plusieurs recherches ont eu recours à des techniques de neuro-imagerie comme l'électrophysiologie et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) pour tenter de cerner les structures et les mécanismes neuraux qui sous-tendent les effets sur la performance comportementale. Certes, les études qui seront présentées dans la prochaine section sont de nature transversale et les participants recrutés ont généralement une aptitude aérobie extrême (i.e. inférieure au 30^e centile ou supérieure au 70^e centile). De plus la pratique régulière d'activités physiques n'est pas directement mesurée. Elle est plutôt inférée à partir de l'aptitude cardiovasculaire. Toutefois, ces études présentent l'avantage d'avoir cerné des fonctions cognitives précises en plus d'avoir contrôlé pour des facteurs confondants tels que le quotient intellectuel, le statut socioéconomique, la présence d'un trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité et le stade de la puberté.

Études comportementales et électrophysiologiques

Dans la littérature, on recense sept études qui ont examiné la relation entre l'aptitude aérobie et le fonctionnement cognitif de l'enfant ou de l'adolescent (voir Tableau 3.III) (Buck, Hillman, & Castelli, 2008; Chaddock, Hillman, Buck, & Cohen, 2011; Hillman, Castelli, & Buck, 2005; Hillman, Pontifex, et al., 2009;

Pontifex et al., 2011; Stroth et al., 2009; Wu et al., 2011). Au niveau des mesures comportementales, on constate que l'exactitude des réponses est généralement plus élevée chez les enfants qui profitent d'une aptitude aérobie supérieure (Buck et al., 2008; Chaddock et al., 2011; Hillman, Pontifex, et al., 2009; Pontifex et al., 2011; Wu et al., 2011). Ce résultat semble se généraliser autant avec les tests qui évaluent l'inhibition que ceux qui mesurent la mémoire. Toutefois, il importe de nuancer cette conclusion puisque certaines recherches n'ont trouvé aucune différence en ce qui a trait à l'exactitude des réponses (Hillman et al., 2005; Stroth et al., 2009). Le temps de réaction apparaît beaucoup moins sensible aux effets de l'aptitude cardiovasculaire. En effet, seuls Hillman et collaborateurs (2005) suggèrent une relation entre les temps de réaction et la condition physique. Les travaux de Wu et collègues (2011) révèlent cependant moins de variabilité pour les temps de réponse chez les enfants ayant une aptitude aérobie élevée.

Tableau 3.III. Résumé des études ayant apprécié l'effet de l'aptitude aérobie sur des variables comportementales et électrophysiologiques

Auteurs	N par groupe		Tests cognitifs	Variables comportementales		Variables électrophysiologiques					
	HF	LF		Exact rép.	TR	N2 (amp)	N2 (lat)	P3 (amp)	P3 (lat)	ERN (amp)	Pe ou CNV (amp)
Hillman, Castelli, & Buck (2005)	12	12	« <i>Oddball</i> »	ns	HF < LF	---	---	HF > LF	HF < LF	---	---
Buck, Hillman, & Castelli (2008)	74*		Stroop	HF > LF	---	---	---	---	---	---	---
Hillman et al. (2009)	24	24	« <i>Flanker</i> » modifié	HF > LF	ns	ns	---	HF > LF	ns	HF < LF	HF > LF
Stroth, et al. (2009)	17	16	« <i>Flanker</i> » modifié	ns	ns	HF < LF	---	ns	ns	---	HF > LF
Chaddock, Hillman, Buck, & Cohen (2011)	22	24	Mémoire associative	HF > LF	---	---	---	---	---	---	---
Pontifex et al. (2011)	24	24	« <i>Flanker</i> » modifié	HF > LF	ns	HF < LF	HF < LF	HF > LF	HF < LF	HF < LF	---
Wu et al. (2011)	24	24	« <i>Flanker</i> » modifié	HF > LF	ns	---	---	---	---	---	---

Note : HF = «*high-fit*» (aptitude aérobie élevée); LF = «*low-fit*» (aptitude aérobie faible); Exact rép. = exactitude des réponses; TR = temps de réaction; amp = amplitude de la composante; lat = latence de la composante; ns = aucune différence significative entre les groupes; --- = non mesuré dans l'article; *régression linéaire.

Au niveau des mesures électrophysiologiques, il faut souligner la contribution importante de Hillman et ses collègues (2005) qui sont les premiers à avoir utilisé une technique de neuro-imagerie pour cerner la relation entre l'aptitude aérobie et le fonctionnement cognitif chez l'enfant. L'enregistrement de l'activité neurale simultanément à la passation d'un test cognitif permet d'extraire plusieurs composantes électrophysiologiques reflétant différentes étapes dans le traitement cognitif de l'information dont les processus d'inhibition (N2), de la mise à jour de la mémoire de travail (amplitude de P3), de la détection des erreurs (ERN) et de la préparation à la tâche (Pe et CNV). À ce jour, quatre études ont apprécié la relation entre l'aptitude aérobie et le fonctionnement cognitif à partir de l'enregistrement de l'activité neurale chez l'enfant (Hillman, Buck, Themanson, Pontifex, & Castelli, 2009; Hillman et al., 2005; Pontifex et al., 2011) et chez l'adolescent (Stroth et al., 2009). Les résultats de ces recherches sont détaillés dans le Tableau 3.III. Parmi les composantes électrophysiologiques étudiées, la P3 est systématiquement plus élevée chez les enfants ayant une aptitude cardiovasculaire supérieure, ce qui suggère une meilleure capacité d'attention pour la mise à jour de la mémoire de travail (Hillman, Buck, et al., 2009; Pontifex et al., 2011). Par contre, l'étude de cette même composante chez les adolescents ne suggère aucune différence en fonction de la condition physique (Stroth et al., 2009). Les effets de l'aptitude aérobie sur l'amplitude de la N2 et la latence de la P3 sont plus équivoques. En effet, une recherche suggère qu'une bonne aptitude cardiovasculaire est bénéfique au processus d'inhibition et à la vitesse du traitement cognitif de l'information (Pontifex et al., 2011), une autre révèle seulement des bienfaits pour la composante N2 (Stroth et al., 2009) tandis qu'Hillman et ses collègues (2009) ne trouvent aucune différence quel que soit l'indice étudié. Finalement, même si les composantes ERN et CNV (ou Pe) n'ont pas été examinées dans toutes les études, les résultats suggèrent qu'une aptitude aérobie élevée est bénéfique aux processus de détection des erreurs (Hillman, Buck, et al., 2009; Pontifex et al., 2011) ainsi qu'à la préparation à la tâche (Hillman, Buck, et al., 2009; Stroth et al., 2009). Bref, parmi les indices électrophysiologiques du fonctionnement cognitif, la composante P3 est particulièrement bien documentée et

elle semble suffisamment sensible pour révéler les effets positifs de la pratique régulière d'activités physiques sur le cerveau du préadolescent.

Études volumétriques

Deux études récentes ont utilisé l'IRM pour apprécier le volume des structures cérébrales qui sous-tendent les processus de la mémoire (Chaddock, Erickson, Prakash, Kim, et al., 2010) et du contrôle de l'inhibition (Chaddock, Erickson, Prakash, VanPatter, et al., 2010). Dans une première étude, Chaddock, Erickson, Prakash, Kim et collaborateurs (2010) ont examiné la relation entre l'aptitude cardiovasculaire, le volume de l'hippocampe et la performance mnésique chez des préadolescents et des préadolescentes. Ils ont conclu que les bienfaits de l'aptitude aérobie sur la mémoire associative passeraient par une augmentation du volume de l'hippocampe. De plus, ils ont constaté une certaine spécificité des effets puisque le volume de la région témoin, les noyaux accumbens, était similaire quel que soit le statut de la condition physique. Dans une seconde étude, le groupe de recherche de Chaddock, Erickson, Prakash, VanPatter et collaborateurs (2010) a examiné la relation entre l'aptitude aérobie, le volume du striatum et du globus pallidus et le contrôle de l'inhibition chez des garçons et filles de 9 et 10 ans. Les résultats de cette recherche suggèrent que les effets positifs de la condition physique sur le contrôle de l'inhibition seraient, au moins en partie, attribuables à une augmentation du volume de striatum dorsal et du globus pallidus.

Les études transversales présentées dans cette section doivent cependant être interprétées avec une certaine réserve. Tout d'abord, les participants recrutés dans ces recherches avaient une condition physique qui peut être qualifiée d'extrême. En effet, dans la majorité des études l'aptitude cardiovasculaire était soit inférieure au 30^e centile, soit supérieure au 70^e centile selon les normes établies en fonction de l'âge. On ignore donc si les conclusions de ces études se généralisent aux enfants ayant une condition physique intermédiaire. Ensuite, malgré le contrôle effectué quant à certaines variables comme le quotient intellectuel, le statut socioéconomique,

la présence d'un trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité et le stade de la puberté, il est impossible d'exclure la possibilité qu'un facteur autre comme la nutrition, la génétique, les traits de personnalité, la stimulation intellectuelle ou la motivation ait modulé la relation observée. Nonobstant la qualité des mesures cognitives, il est nécessaire de développer des protocoles d'intervention avec assignation aléatoire des participants et mesures précises du fonctionnement cognitif.

3.3 Effets chroniques de l'activité physique et études expérimentales

Six études seront décrites dans cette section, mais seulement deux respectent les critères d'une étude expérimentale avec assignation aléatoire des sujets et des mesures pré et post-intervention de fonctions cognitives précises (Davis et al., 2011; Kamijo et al., 2011).

Tuckman et Hinkle (1986) ont étudié l'effet d'un programme de course en milieu scolaire sur la performance à certains tests cognitifs. Pendant 12 semaines, 154 élèves de 4^e, 5^e et 6^e années ont été assignés aléatoirement à un programme quotidien d'éducation physique « régulier » de sports collectifs (ex. basket-ball, volley-ball) ou « spécialisé » (course en endurance, par intervalles et à relais). Les tests cognitifs utilisés étaient le *Bender-Gestalt* (habiletés perceptivo-motrices), *Alternate Uses test* (créativité) et *Maze Tracing Speed test* (habiletés de planification et de coordination visuo-motrice). Au terme de l'intervention les résultats montrent que le groupe expérimental est avantagé par rapport au groupe témoin au niveau cardiovasculaire et cognitif (test de créativité). Le même groupe de chercheurs ont mis en œuvre une intervention similaire chez 88 élèves du secondaire pendant 8 semaines (Hinkle, Tuckman, & Sampson, 1993). Ils ont eu recours au *Torrance Tests of Creative Thinking* (test de créativité). Tout comme pour les élèves du primaire, le programme « spécialisé » s'est révélé bénéfique à la santé cardiovasculaire et à la créativité.

Zervas et ses collaborateurs (1991) ont examiné l'impact d'un programme d'entraînement sur la prise de décision chez des garçons (9 paires de jumeaux monozygotes) âgés entre 11 et 14 ans. Pour chaque paire, un des jumeaux était assigné à un programme de course sur tapis roulant tandis que l'autre était assigné à une condition témoin. Le programme, d'une durée de 25 semaines, était composé de trois entraînements hebdomadaires de course par intervalles dont la durée était d'environ 60 min. Les résultats suggèrent une légère amélioration de la fonction cardiovasculaire chez le groupe entraîné. Sur le plan cognitif, aucune différence n'est trouvée entre les groupes étudiés. Malheureusement, ce résultat est difficilement interprétable puisqu'aucune mesure pré-intervention n'a été documentée. Malgré l'assignation aléatoire de chaque paire de jumeau, il est impossible de déterminer s'ils avaient une performance cognitive équivalente avant l'intervention.

Deux publications récentes ont évalué l'impact du programme *Fitness Improves Thinking* (FIT Kids) sur le fonctionnement cognitif de préadolescents âgés entre 7 et 9 ans (Castelli, Hillman, Hirsch, Hirsch, & Drollette, 2011; Kamijo et al., 2011). FIT Kids est un programme quotidien d'activités physiques en milieu scolaire d'une durée de 9 mois. Les 40 premières minutes de chaque séance sont consacrées à l'amélioration de la condition physique par le biais d'activités physiques variées tandis que les 80 min subséquentes laissent place à des activités physiques de faible intensité dédiées au développement des habiletés motrices ainsi qu'à une pause collation et hydratation. Castelli et collaborateurs (2011) ont examiné la relation entre l'intensité des activités physiques et les effets sur la performance des participants au test de Stroop et au *Comprehensive Trail Making Test*. Ils ont trouvé une association négative entre la proportion de temps d'entraînement se déroulant selon une intensité supérieure à 80 % de la FCmax et le temps requis pour compléter les conditions qui sollicitaient davantage le processus d'inhibition pour chaque test. Cela suggère que la pratique d'activités physiques à haute intensité est bénéfique à la capacité d'inhibition de l'enfant. Toutefois, dans cet article, les résultats obtenus pour les enfants ayant participé à l'intervention n'ont pas été comparés à ceux d'un groupe témoin. Kamijo et collaborateurs (2011) ont fait passer un test de mémoire de travail (Sternberg

modifié) à 20 enfants qui avaient été assignés à l'intervention ainsi qu'à 16 enfants témoins. Des mesures électrophysiologiques en lien avec la préparation à cette tâche (CNV) ont également été documentées avant et après l'intervention. Les indices comportementaux et électrophysiologiques montrent, respectivement, une augmentation de l'exactitude des réponses et une diminution de l'amplitude de la iCNV que les auteurs interprètent comme un effet bénéfique de l'intervention sur la mémoire de travail et sur le processus de préparation cognitive.

Davis et collaborateurs (2011) ont étudié l'effet de la pratique régulière d'activités physiques sur le fonctionnement cognitif de l'enfant. Les 171 participants incluent dans cette étude étaient âgés entre 7 et 11 ans. Ils avaient un IMC supérieur au 85^e centile et ils rapportaient faire moins d'une heure d'activités physiques organisées par semaine. Pendant 13 semaines, les enfants ont été assignés aléatoirement 1) à un groupe témoin inactif ou 2) à un groupe actif bénéficiant de cinq séances d'activités physiques par semaine. Ces séances étaient offertes i) à faible dose (i.e. 20 min par séance) auprès de la moitié du groupe actif et ii) à dose élevée pour l'autre moitié (i.e. 40 min par séance). Les activités physiques (ex. course, saut à la corde, basket-ball modifié, soccer) ont conduit à l'atteinte d'une FCmoy de 166 bpm. Au terme du programme, l'évaluation du fonctionnement cognitif par le CAS (*Cognitive Assessment System*) révèle une amélioration significative au test de planification chez les enfants désignés aux groupes actifs, de même qu'une relation linéaire positive entre le volume d'entraînement et le degré d'amélioration. Par contre, aucune différence n'a été trouvée pour les tests d'attention, d'habiletés spatiales, de logique ou de rappel de séquences. En outre, des mesures d'IRM, simultanément à une tâche d'inhibition (anti saccades) chez un sous-groupe de participants (n = 20), indiquent une augmentation de l'activité dans le cortex préfrontal bilatéral et une diminution de l'activité dans le cortex pariétal postérieur chez les enfants actifs.

3.4 Modérateurs de la relation entre l'exercice physique chronique et les fonctions cognitives

Paramètres d'intervention

Seules les études portant sur des programmes d'activités physiques en milieu scolaire et les recherches expérimentales peuvent nous éclairer sur les paramètres d'une intervention efficace (nature, durée, fréquence, intensité). On constate que des programmes de 13 semaines ou moins (Davis et al., 2011; Fredericks et al., 2006; Hinkle et al., 1993; Tuckman & Hinkle, 1986; Uhrich & Swalm, 2007) peuvent être tout aussi bénéfiques aux aptitudes scolaires et aux fonctions cognitives que des programmes de plus longue durée (Donnelly et al., 2009; Ericsson, 2008; Kamijo et al., 2011). Ces derniers sont généralement offerts quotidiennement et ils sont développés de façon à améliorer la condition physique et les habiletés motrices de l'enfant. Des études récentes se sont penchées sur le volume (Davis et al., 2011) et l'intensité des activités physiques (Castelli et al., 2011). Ainsi, selon les travaux de Davis et collaborateurs (2011) il y aurait une relation dose-réponse linéaire entre le volume d'une intervention et l'amélioration du fonctionnement cognitif. Qui plus est, les gains cognitifs seraient associés à la pratique d'activités physiques d'intensité élevée (Castelli et al., 2011).

Fonctions cognitives ciblées

Les études expérimentales et transversales nous informent quant aux effets de l'activité physique sur le fonctionnement cognitif de l'enfant. Par exemple, les recherches transversales ayant examiné des indices comportementaux du fonctionnement cognitif suggèrent que l'aptitude aérobie d'un enfant est associée à des effets positifs assez globaux (Buck et al., 2008; Wu et al., 2011). Cela contraste avec les travaux de Davis et collaborateurs (2011) qui concluent que les effets d'un programme d'activités physiques sont circonscrits aux fonctions exécutives de même qu'avec les interventions qui ont été associées à des effets positifs sur la créativité (Hinkle et al., 1993; Tuckman & Hinkle, 1986), une fonction que certains auteurs considèrent étroitement liée aux fonctions exécutives (Lezak, Howieson, Loring,

Hannay, & Fisher, 2004; Naglieri & Kaufman, 2001). De plus, l'utilisation des techniques de neuro-imagerie révèle que la composante P3 est un indice du fonctionnement cognitif particulièrement sensible à l'aptitude aérobie. En effet, la condition physique est systématiquement associée positivement à l'amplitude de cette composante chez les enfants (Hillman, Buck, et al., 2009; Hillman et al., 2005; Pontifex et al., 2011). Les fonctions mnésiques seraient, elles aussi, modulées par l'aptitude aérobie, c'est du moins ce que révèlent deux études transversales récentes (Chaddock, Erickson, Prakash, Kim, et al., 2010; Chaddock et al., 2011). À ce jour, ni la composante P3 ni les fonctions mnésiques n'ont été examinées dans le cadre d'un programme d'activités physiques.

3.5 Modèles théoriques

Plusieurs modèles théoriques (ou hypothèses) ont été suggérés pour tenter de cerner les effets de la pratique régulière d'activités physiques sur le fonctionnement cognitif. Parmi les modèles proposés, certains suggèrent que les effets observés sont tributaires de la nature des exercices physiques (ex. hypothèse cardiovasculaire et hypothèse « fronto-cérébelleuse-cognitivo-motrice »), d'autres indiquent plutôt qu'ils sont tributaires de changements neuraux spécifiques (ex. hypothèse des fonctions exécutives et hypothèse de plasticité synaptique dans l'hippocampe). Les différents modèles qui seront présentés n'étant pas nécessairement mutuellement exclusif, l'un ou plusieurs d'entre eux peuvent expliquer les résultats d'une intervention.

Hypothèse cardiovasculaire

Selon l'hypothèse cardiovasculaire, l'amélioration de l'aptitude cardiovasculaire, consécutive à la pratique régulière d'activités physiques, est responsable des effets positifs sur le fonctionnement cognitif (Barnes, Yaffe, Satariano, & Tager, 2003; Dustman, Emmerson, & Shearer, 1994; vanBoxtel, Langerak, Houx, & Jolles, 1996). Par conséquent, une augmentation de l'aptitude cardiovasculaire est essentielle à une amélioration des fonctions cognitives. Même si cette hypothèse n'a pas été confirmée par la méta-analyse d'Etnier et de ses collègues

(2006), elle demeure la prémisse de nombreuses études récentes (Chaddock, Erickson, Prakash, Kim, et al., 2010; Chaddock, Erickson, Prakash, VanPatter, et al., 2010; Chaddock et al., 2011; Pontifex et al., 2011; Wu et al., 2011).

Hypothèse « fronto-cérébelleuse-cognitivo-motrice »

Selon l'hypothèse « fronto-cérébelleuse-cognitivo-motrice », le développement du domaine moteur contribuerait à celui du domaine cognitif. Plus précisément, cette prémisse est fondée sur le développement parallèle des fonctions motrices et cognitives de même que sur l'interrelation entre le cervelet et le cortex préfrontal (Diamond, 2000). Ainsi, des interventions basées sur le développement des habiletés motrices fines, de la coordination bi-manuelle et des habiletés visuo-motrices de l'enfant seraient particulièrement bénéfiques aux fonctions cognitives soutenues par le cortex préfrontal : c'est-à-dire les fonctions exécutives. À ce jour, l'état de la littérature ne permet ni d'infirmer, ni de confirmer cette hypothèse.

Hypothèse des fonctions exécutives

L'hypothèse des fonctions exécutives est en grande partie inspirée d'une méta-analyse de Colcombe et Kramer (2003) qui suggère que les bienfaits de l'exercice aérobie sur le fonctionnement cognitif de la personne âgée sont sélectifs aux fonctions dites exécutives. Certains auteurs sont d'avis que cette prémisse s'applique aussi à l'enfant (Best, 2010; Davis et al., 2011; Tomporowski, Davis, Miller, et al., 2008) notamment à cause de la maturation tardive de cette catégorie de fonctions (Davidson et al., 2006; Diamond, 2002). Or, une méta-analyse de 44 études portant sur la relation entre la pratique d'activités physiques et le fonctionnement cognitif chez l'enfant conclut à un effet de petite taille ($d = 0.32$) qui se généralise à plusieurs habiletés cognitives (habiletés perceptuelles, quotient intellectuel, réussite scolaire, habiletés verbales, habiletés en mathématiques, préparation scolaire) sauf à la mémoire (Sibley & Etnier, 2003). Il semble donc pertinent d'évaluer plusieurs processus cognitifs à l'intérieur d'un même protocole expérimental.

Hypothèse de plasticité synaptique dans l'hippocampe

La recherche animale cumule de nombreuses évidences en lien avec cette hypothèse. En effet, les rongeurs exposés à une roue d'exercice volontaire démontrent une meilleure performance mnésique au test du *Morris water maze* (Ding, Vaynman, Akhavan, Ying, & Gomez-Pinilla, 2006; van Praag, Christie, Sejnowski, & Gage, 1999; Vaynman, Ying, & Gomez-Pinilla, 2004). Cette amélioration serait supportée par la relâche de certains facteurs de croissance et de neuroprotection (IGF-I, VEGF, BDNF) lors de l'exercice cardiovasculaire. À leur tour, ceux-ci activeraient les mécanismes de neurogénèse, de plasticité synaptique et d'angiogénèse dans l'hippocampe (Christie et al., 2008; Ploughman, 2008; van Praag, 2009).

3.6 Conclusions

La littérature quant aux effets chroniques de l'activité physique sur le fonctionnement cognitif nous a permis de documenter les caractéristiques d'un programme d'activités physiques efficace. Ce dernier devrait être offert quotidiennement pour une durée minimale de 6 à 13 semaines et être constitué :

- 1) d'activités physiques sollicitant le système cardiorespiratoire et dont l'intensité est supérieure à 80 % de la FCmax;
- 2) d'activités physiques qui stimulent le développement des habiletés motrices telles que la manipulation de ballons et les sports collectifs.

Enfin, la recension d'écrits a mis en évidence un écart important entre la recherche expérimentale et transversale non seulement quant aux processus cognitifs étudiés, mais aussi quant aux résultats trouvés. Dans le but de joindre les deux approches, une troisième étude sera incluse dans cette thèse (section 5.4). Elle évaluera les effets d'un programme d'activités physiques de 12 semaines sur des indices neurophysiologiques du fonctionnement cognitif dont la composante P3 et la composante N400 qui est associée à la mémoire à long terme.

CHAPITRE 4

MESURES ÉLECTROPHYSIOLOGIQUES

Cette section vise à introduire le lecteur aux techniques de l'électroencéphalogramme (EEG) et des potentiels liés aux événements (ERP) puisqu'elles fourniront les principales mesures du fonctionnement cognitif dans le cadre de cette thèse.

L'électrophysiologie consiste à mesurer l'activité électrique des cellules vivantes à partir d'électrodes. Les premiers EEG, tracés de l'activité électrique du cerveau humain, ont été enregistrés par Hans Berger en 1929 à partir d'électrodes placées sur le scalp. Le développement des connaissances a permis de préciser la nature de l'EEG. On sait aujourd'hui que l'EEG reflète principalement la sommation de potentiels post-synaptiques des cellules pyramidales orientées perpendiculairement à la surface du cortex (Csibra, Kushnerenko, & Grossmann, 2008; Luck, 2005). La proximité des cellules pyramidales et leur synchronisation sont des conditions essentielles pour capturer l'activité électrique du cerveau humain (Csibra et al., 2008).

Il est difficile d'interpréter un EEG à l'état brut parce qu'il représente l'activité de plusieurs centaines de sources neurales. Il convient donc d'analyser le signal en fonction de certaines de ses caractéristiques. Cela peut être fait à partir d'une analyse quantitative des fréquences qui composent l'EEG (analyse spectrale) ou encore en fonction de l'EEG spécifique à la présentation de stimuli (moyenne des ERP).

4.1 Analyse spectrale

L'analyse de puissance spectrale consiste à décomposer l'EEG en différentes bandes de fréquence et à examiner la puissance associée à chacune d'entre elles. L'EEG est constitué de cinq principales bandes de fréquence: delta (0-4 Hz), thêta (4-

8 Hz), alpha (8-12 Hz), bêta (12-30 Hz) et gamma (>30 Hz). Elles nous renseignent sur l'état général de vigilance d'une personne (Csibra et al., 2008; Niedermeyer, 2005). Chez un individu éveillé, au repos et dont les yeux sont fermés, la bande de fréquence dominante est l'alpha. Cette dernière est généralement subdivisée en sous-bandes: alpha1 (8-10 Hz) et alpha2 (10-12 Hz) et chacune d'elles est associée à une interprétation fonctionnelle distincte. Ainsi, une augmentation de puissance dans les bandes lentes (thêta et alpha1) reflète un état de fatigue ou de somnolence (Cajochen, Brunner, Kräuchi, Graw, & Wirz-Justice, 1995; Niedermeyer, 2005) tandis qu'une augmentation de puissance dans les bandes rapides (alpha2 et bêta) est associée positivement à la performance cognitive et à l'activité mentale intense (Fonseca, Tedrus, Chiodi, Cerqueira, & Tonelotto, 2006; Niedermeyer, 2005). Il est généralement accepté qu'une réduction de puissance dans les bandes lentes au profit des bandes rapides reflète un état de vigilance accru.

4.2 ERP

On peut aussi extraire l'activité neurale spécifique à certains aspects du traitement sensoriel, cognitif ou moteur en moyennant l'activité évoquée par un événement donné (Luck, 2005). C'est ce qu'on appelle les ERP. Ceux-ci sont caractérisés en fonction de leur polarité (N = négative, P = positive) et de leur ordre d'apparition ou de leur latence (ex. P1, N1, P2, N2, P3 ou P300, N400). Les composantes précoces, par exemple P1 ou N1, sont des réponses sensorielles évoquées par un stimulus visuel ou auditif. Ce sont des composantes dites exogènes. Elles sont dépendantes de facteurs externes tel que les caractéristiques physiques du stimulus (ex. couleur, intensité) (Csibra et al., 2008; Luck, 2005). Des composantes plus tardives comme la P300 et la N400 sont dites endogènes. Elles sont dépendantes de facteurs internes tels que les consignes liées à la tâche et le paradigme expérimental (Csibra et al., 2008; Luck, 2005). La P300 et la N400 sont des composantes qui permettent l'étude du traitement cognitif de l'information.

Les ERP constituent une alternative très intéressante aux tests cognitifs traditionnels qui consistent à évaluer l'exactitude des réponses et les temps de

réaction. En effet, les ERP ont l'avantage de fournir une mesure continue des processus qui se produisent entre la présentation du stimulus et l'exécution de la réponse. On peut, par exemple, cerner plus précisément si les effets d'une manipulation expérimentale sont de nature sensorielle, cognitive ou motrice (Csibra et al., 2008; Luck, 2005). Un second avantage des ERP, c'est qu'ils permettent d'étudier des processus qui ne requièrent pas de réponse ouverte. Ainsi, on peut non seulement examiner les processus reliés à des stimuli attendus, mais aussi à des stimuli qui doivent être ignorés et qui ne demandent pas de réponses comportementales (Luck, 2005).

En comparaison avec les autres techniques de neuro-imagerie, les ERP ont l'avantage d'être non invasifs et relativement peu coûteux. Qui plus est, leur résolution temporelle est remarquable. Toutefois, la sommation des nombreuses sources neurales et la diffusion de l'activité cérébrale lorsqu'elle traverse le crâne font des ERP une technique peu précise sur le plan de la résolution spatiale (Luck, 2005).

4.2.1 P300

Historique

À ce jour, la P300 est l'ERP cognitif qui a été l'objet du plus grand nombre de publications. Elle a été découverte par Sutton, Braren, Zubin et John (1965). Ils ont observé que les événements imprévisibles, comparativement aux événements prévisibles, engendraient une composante positive de plus grande amplitude. Une dizaine d'années plus tard, Squires, Squires et Hillyard (1975) ont mis en évidence deux composantes dans l'intervalle de la P300 : P3a et P3b.

Paradigmes expérimentaux

La P3b (ou P300, P3) a surtout été étudiée à partir du paradigme de type « *oddball* » à deux stimuli. La tâche de « *oddball* » consiste à identifier une cible peu fréquente dans une séquence de stimuli fréquents. Les stimuli sont généralement

présentés selon la modalité visuelle (ex. formes géométriques, lettres de l'alphabet) ou auditive (ex. fréquences sonores). Une troisième catégorie de stimulus peut être ajoutée au paradigme (« *oddball* » à trois stimuli). Elle est composée de stimuli peu fréquents et non pertinents à la tâche ou « surprenants ». Cette catégorie permet de cerner la P3a.

Caractéristiques de la P3b, P3a et Nc

La P3b se définit comme une composante positive dont l'amplitude est maximale sur les électrodes centro-pariétales environ 300 ms après la présentation du stimulus cible peu fréquent (Picton, 1992). Son amplitude est augmentée lorsque la probabilité d'apparition du stimulus cible est faible (Johnson & Donchin, 1982; Squires, Wickens, Squires, & Donchin, 1976) et que la capacité d'attention disponible pour la tâche est élevée (voir (Polich, 2007) pour une revue). La difficulté de la tâche, notamment au niveau de la discrimination des stimuli, est un facteur qui tend à diminuer l'amplitude de la P3b et à augmenter la latence (Magliero, Bashore, Coles, & Donchin, 1984; Polich, 1987). Enfin, la latence de la P3b est également sensible aux habiletés cognitives d'un individu. Elle est réduite durant le développement (Courchesne, 1978; Howard & Polich, 1985) et elle est plus courte chez les individus qui démontrent une performance cognitive supérieure (Emmerson, Dustman, & Shearer, 1989; Johnson, Pfefferbaum, & Kopell, 1985; Polich, Howard, & Starr, 1983).

La P3a est une composante positive qui se distingue de la P3b par sa latence plus courte et par une distribution topographique centro-frontale (Comerchero & Polich, 1999; Courchesne, Hillyard, & Galambos, 1975; Squires et al., 1975). L'amplitude de la P3a est élevée lorsque les caractéristiques physiques du stimulus peu fréquent et non pertinent sont saillantes (Hagen, Gatherwright, Lopez, & Polich, 2006). L'effet de saillance peut être obtenu en présentant des stimuli peu fréquents qui sont constamment nouveaux (ex. dessins abstraits, sons de l'environnement) (Courchesne et al., 1975; Wetzel & Schröger, 2007) ou en manipulant la difficulté de

discrimination entre le stimulus fréquent et le stimulus cible peu fréquent (Comerchero & Polich, 1999; Sawaki & Katayama, 2006, 2007).

L'insertion de stimuli peu fréquents et non pertinents à la tâche induit, chez l'enfant, une composante négative (Nc). En effet, Courchesne (1978) a examiné les ERP en réponse à un paradigme de « *oddball* » visuel à trois stimuli chez des sujets de 6 à 36 ans. Les résultats révèlent une composante (P3b) similaire à l'adulte en réponse aux stimuli peu fréquents et pertinents à la tâche. Toutefois, l'ERP produit par les stimuli peu fréquents et non pertinents à la tâche est caractérisé, chez l'enfant, par une négativité frontale maximale aux alentours de 400 ms (Nc). Tout comme la P3a, la Nc est sensible à la saillance du stimulus. Les événements peu fréquents et non pertinents provoquent une Nc plus ample lorsqu'ils sont constamment nouveaux (Courchesne, 1977, 1978) et parfois de latence plus courte (Courchesne, 1977).

Théories de la P3b et Nc

La théorie de « *context updating* » proposée par Donchin (1981) pour expliquer la P3b activée par le paradigme de « *oddball* » demeure, encore aujourd'hui, largement acceptée (pour une discussion sur le sujet voir (Polich, 2007)). Selon cette théorie, la P3b reflète un processus de mise à jour de l'information en mémoire de travail. Ainsi, chaque fois qu'un stimulus est présenté, celui-ci est comparé avec un modèle de représentation de l'environnement en mémoire de travail. Lorsque le stimulus est différent du contenu en mémoire de travail (c'est le cas pour les essais peu fréquents et pertinents à la tâche), il y a mise à jour de la mémoire de travail et production de la P3b. En ce qui a trait à la latence, il s'agit d'un indice de la vitesse de classification du stimulus qui est relativement indépendant du processus de sélection de la réponse (Kutas, McCarthy, & Donchin, 1977; Magliero et al., 1984).

Il est généralement accepté que la Nc sous-tend un processus distinct de la P3a (Courchesne, 1978; Courchesne, Ganz, & Norcia, 1981). Elle reflèterait un mécanisme de capture de l'attention tel que la perception des stimuli attrayants,

importants, intéressants ou inattendus qui requièrent un traitement plus approfondi (Courchesne, 1978, 1987; Courchesne et al., 1981).

Générateurs de la P3b et Nc

Les premières études qui ont tenté de cerner les générateurs neuraux de la P3b ont été menées chez des patients épileptiques avec des électrodes implantées dans le lobe temporal médian (Halgren et al., 1980; McCarthy, Wood, Williamson, & Spencer, 1989). À partir de ces travaux, il a été suggéré que la formation hippocampique pourrait jouer un rôle dans la production de la P3b. Or, Johnson (1988) n'a trouvé aucun changement dans la distribution topographique de la P3b chez des individus ayant subi une lobectomie temporale unilatérale. Toutefois, on a observé une réduction de l'amplitude de la P3b chez les patients lésés au niveau de la jonction temporo-pariétale (Knight, Scabini, Woods, & Clayworth, 1989; Verleger, Heide, Butt, & Kömpf, 1994). Bien qu'à ce jour, il n'existe aucun consensus quant à la localisation précise des générateurs de la P3b, l'utilisation de l'IRM fonctionnelle a permis de mettre en évidence des sources neurales importantes dans les portions inférieures et supérieures du lobe pariétal (Bledowski et al., 2004; Kiehl, Laurens, Duty, Forster, & Liddle, 2001). Ces résultats sont cohérents avec la réduction d'amplitude observée chez les patients dont l'intégrité de la jonction temporo-pariétale est compromise. Qui plus est, d'autres sources, contribuant de façon moins significative, seraient localisées dans le cortex préfrontal (Bledowski et al., 2004; Kiehl et al., 2001; Kirino, Belger, Goldman-Rakic, & McCarthy, 2000), dans le cortex temporal inférieur (Bledowski et al., 2004; Kiehl et al., 2001) et dans la proximité du thalamus (Kiehl et al., 2001; Mecklinger et al., 1998). Les sources neurales de la P3b sont multiples et les principaux générateurs de l'ERP seraient localisés dans le lobe pariétal.

Les générateurs de la Nc sont nettement moins documentés que ceux de la P3b et ils demeurent hautement spéculatifs. Ils seraient possiblement localisés dans le cortex préfrontal et dans le cortex cingulaire antérieur (Reynolds & Richards, 2005).

Toutefois, ces conclusions résultent d'une analyse par composantes indépendantes (ICA) sur des ERP recueillis chez des enfants âgés entre 20 et 32 semaines. Cela limite la généralisation des résultats. Le rôle du cortex frontal dans la production de la Nc est cependant fort plausible considérant que son développement est concomitant à celui de la Nc. Par ailleurs, on a aussi suggéré que la Nc soit générée par des potentiels post-synaptiques qui sont régulés par des afférences cholinergiques corticales ou thalamiques (Courchesne, 1987; Courchesne, Elmasian, & Yeung-Courchesne, 1987).

Développement de la P3b et Nc

L'apparition de la P3b vers l'âge de 3 ans serait concomitante au développement de l'hippocampe et des fonctions mnésiques conscientes de l'enfant (Courchesne, 1990). Typiquement, durant l'enfance, on assiste à une réduction graduelle de l'ordre de 300 ms de la latence de la P3b jusqu'à l'atteinte d'une valeur mature à l'adolescence (Fuchigami et al., 1995) et parfois même à l'âge adulte (Courchesne, 1978). Toutefois, l'effet du développement sur l'amplitude de la composante ne semble pas faire consensus. Certains travaux rapportent une réduction de l'amplitude (Courchesne, 1978; Hill et al., 1999; Stige, Fjell, Smith, Lindgren, & Walhovd, 2007) alors que d'autres ne trouvent aucune différence avec l'adulte (Courchesne, 1977; Van der Stelt, 1999).

La Nc serait la première composante endogène à apparaître durant le développement (Courchesne et al., 1981; Karrer & Ackles, 1987). Il est possible d'induire une Nc chez un enfant de 6 mois, en présentant des stimuli visuels qui sont attrayants ou saillants (Courchesne et al., 1981; Karrer & Ackles, 1987). Après un rapide gain d'amplitude durant la petite enfance, les principaux changements observés durant le développement sont une réduction importante de la latence ainsi qu'une réduction de l'amplitude (Courchesne, 1978, 1990; Kihara et al., 2010). Ces changements seraient supportés par la myélinisation des radiations thalamiques et par

l'élagage synaptique dans le cortex (Courchesne, 1990). La transition vers une morphologie d'ERP adulte (P3a) s'effectuerait à l'adolescence (Courchesne, 1978).

4.2.2 N400

Historique

La N400 est un ERP qui permet de cerner l'organisation fonctionnelle de la mémoire sémantique durant la compréhension du langage. Kutas et Hillyard (1980) ont mis en évidence cette composante en étudiant la réponse électrophysiologique évoquée par des mots sémantiquement discordants dans le contexte de la lecture de phrases mot par mot. Ils ont observé que les phrases se terminant par un mot sémantiquement discordant (ex. : il étend du Nutella sur ses toasts avec un camion) évoquaient, 400 ms après leur présentation, une réponse électrophysiologique nettement plus négative que les phrases qui se terminaient par un mot prévisible (ex. : il étend du Nutella sur ses toasts avec un couteau). Ils ont donc suggéré que cette composante négative soit le reflet d'un traitement supplémentaire de l'information sémantique anormale.

Caractéristiques de la N400

Typiquement, la N400 se définit comme une composante négative qui apparaît entre 200 ms et 600 ms suivant le début de la présentation du stimulus. Son amplitude est maximale aux alentours de 400 ms sur les électrodes centro-pariétales avec une distribution légèrement plus marquée sur l'hémisphère droite (Kutas & Federmeier, 2011). L'amplitude de la N400 est principalement modulée par deux facteurs : 1) le contexte sémantique et 2) l'accessibilité de l'information en mémoire sémantique à long terme (Kutas & Federmeier, 2000). En effet, tel que démontré par les travaux de Kutas et Hillyard (1980) l'amplitude de la N400 est augmentée lorsqu'une phrase se termine par un mot discordant au contexte créé par les mots précédents. En ce qui a trait à l'accessibilité de l'information en mémoire sémantique, celle-ci dépend de la fréquence d'utilisation d'un mot, du niveau d'association entre les mots et de la répétition des mots (voir Figure 4.1). En effet, des recherches ont

permis de démontrer que l'amplitude de la N400 est inversement proportionnelle à la fréquence d'utilisation d'un mot (DeLong, Urbach, & Kutas, 2005). Par exemple, la majorité des gens compléterait la phrase : « je prends mon café avec de la crème et du _____ » par le mot « sucre » même si « miel » est tout aussi concordant avec le contexte. Ensuite, la présence d'association entre la réponse prévisible et le mot cible aura pour effet de réduire l'amplitude même si ce dernier est discordant au contexte. Par exemple : « Mon animal de compagnie jappe chaque fois que je rentre à la maison, c'est normal puisque c'est un _____ ». Certes, chat ou camion sont des réponses discordantes au contexte, mais la réponse électrophysiologique sera diminuée pour chat, car ce terme peut facilement être associé à chien étant donné qu'ils réfèrent tous les deux à des animaux domestiques communs. Enfin, l'utilisation répétée d'un mot durant une expérimentation engendrera également une réduction d'amplitude. Bref, tant le contexte immédiat que l'accessibilité des mots en mémoire sémantique sont des facteurs qui font varier l'amplitude de la N400. En ce qui a trait à la latence, elle s'avère une caractéristique relativement stable et elle est très peu sensible aux manipulations expérimentales (Federmeier & Laszlo, 2009).

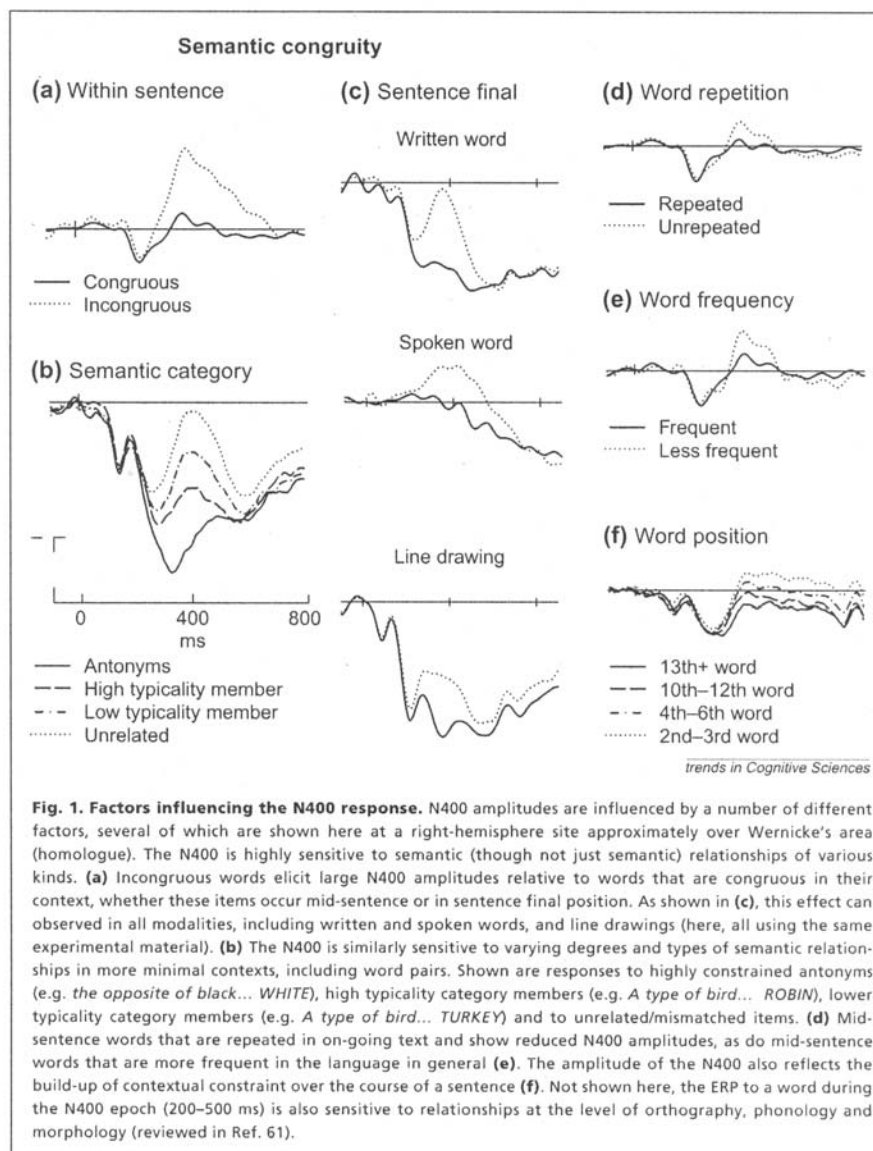


Figure 4.1: Modulation de l'amplitude de la N400 en fonction a) de la concordance avec le contexte, b) du niveau d'association entre les mots, d) de la répétition des mots et e) de la fréquence d'utilisation des mots (tirée de (Kutas & Federmeier, 2000)).

Paradigmes expérimentaux

L'étude de la N400 ne se limite pas à la lecture de phrases mot à mot. Elle peut également être évoquée dans un contexte aussi rudimentaire que la présentation

de paires de mots (ex. (Bentin, 1987; Bentin, McCarthy, & Wood, 1985; Holcomb, 1988; Holcomb & Neville, 1990). La simple présentation d'une amorce est suffisante pour induire des attentes chez le participant et ainsi générer un effet de N400. Qui plus est, les paires de mots peuvent être représentées selon diverses modalités: mots écrits ou pseudo mots (Bentin, 1987; Bentin et al., 1985; Holcomb, 1988), mots parlés (Holcomb & Neville, 1990), sons de l'environnement (van Petten & Rieffers, 1995), dessins (Byrne et al., 1999; Coch, Maron, Wolf, & Holcomb, 2002; Connolly, Byrne, & Dywan, 1995), photographies (McPherson & Holcomb, 1999), visages (Barrett & Rugg, 1989) et odeurs (Sarfarazi, Cave, Richardson, Behan, & Sedgwick, 1999). Ces modalités sont généralement combinées dans les paradigmes expérimentaux. Ainsi, la présentation d'un stimulus auditif peut être consécutive à la présentation d'une image (ex. (Byrne et al., 1999; Connolly et al., 1995)). Enfin, sur le plan fonctionnel, la N400 semble refléter un processus similaire, quelle que soit la modalité employée. Toutefois des différences observées dans la distribution topographique suggèrent des générateurs non identiques (Kutas & Federmeier, 2000).

Théories de la N400

Il est difficile de définir précisément le processus qui sous-tend la N400, notamment parce qu'elle peut être évoquée à partir de plusieurs paradigmes expérimentaux. Il a d'abord été suggéré par Brown et Hagoort (1993) que la N400 soit un processus tardif qui témoigne de l'effort de l'intégration sémantique d'un mot dans un contexte donné. Or, cette théorie ne permet pas d'expliquer la N400 évoquée par les pseudo-mots qui n'ont pas de représentation en mémoire sémantique. En prenant en compte ces observations, Deacon et ses collaborateurs (2004) ont proposé que la N400 reflète un processus précédant la reconnaissance d'un mot et reflétant plutôt une analyse orthographique ou phonologique du mot. Toutefois, il apparaît de plus en plus évident que la N400 représente un processus à mi-chemin entre les théories précédemment proposées. En effet, elle reflèterait l'accès à la mémoire sémantique à proprement dit (Federmeier & Laszlo, 2009; Kutas & Federmeier, 2011). Ainsi, l'accès à la mémoire sémantique serait modulé par le contexte

immédiat, mais aussi par les expériences passées qui forgent la mémoire à long terme.

Générateurs de la N400

Bien que les générateurs neuraux de la N400 demeurent débattus, on s'entend pour dire qu'ils sont multiples et qu'un bon nombre d'entre eux seraient localisés dans les lobes temporaux ce qui concorde relativement bien avec la distribution topographique de la N400. Les connaissances actuelles reposent sur différentes techniques de neuro-imagerie qui ont une résolution spatiale nettement plus précise que l'électroencéphalographie. Ainsi, des enregistrements intracrâniens chez des patients épileptiques ont permis d'apprécier les générateurs dans la région antérieure du lobe temporal médian des hémisphères droit et gauche (McCarthy, Nobre, Bentin, & Spencer, 1995; Nobre & McCarthy, 1995). L'utilisation de la magnétoencéphalographie chez des sujets sains a également révélé la présence de générateurs de la N400 dans le lobe temporal, plus spécifiquement, dans le gyrus temporal gauche supérieur et moyen (Helenius, Salmelin, Service, & Connolly, 1998). Des générateurs ont également été cernés, quoique moins systématiquement, dans le gyrus temporal supérieur de l'hémisphère droit de même que dans le lobe frontal gauche et à la jonction temporo-pariétale (Helenius et al., 1998). Qui plus est, les études en IRM et en imagerie optique confirment généralement la présence de générateurs dans le gyrus temporal supérieur et moyen en plus de suggérer la possibilité de générateurs dans le gyrus frontal inférieur gauche (Tse et al., 2007; Van Petten & Luka, 2006).

Développement de la N400

La N400 est une composante qui peut être évoquée relativement tôt dans le développement. En effet, il a été possible d'observer la N400 chez des enfants âgés de 12 et de 14 mois lorsque des mots parlés étaient présentés consécutivement à une amorce (image) (Friedrich & Friederici, 2010). Par contre, pour que l'effet de N400 puisse être obtenu, il est nécessaire que les mots présentés durant la tâche soient

adaptés au niveau de vocabulaire de l'enfant (Byrne et al., 1999). Le développement de la N400 est caractérisé par une réduction d'amplitude et de latence avec l'âge. Des changements dans la densité neuronale ainsi que la formation de synapses et de ramifications dendritiques expliqueraient, du moins en partie, les effets du développement sur la latence et l'amplitude de la N400 (Holcomb, Coffey, & Neville, 1992). Cependant, à la lumière des connaissances actuelles, il est impossible de cerner précisément le décours temporel des changements liés au développement. En effet, l'âge auquel on trouve une N400 similaire à l'adulte en termes de latence et d'amplitude est très variable entre les études. Par exemple, Hahne et ses collaborateurs (2004) ont observé une N400 mature chez des participants âgés entre 10 et 13 ans, alors qu'Holcomb et ses collègues (1992) ont plutôt suggéré l'âge de 16 ans. Une dépendance élevée au contexte sémantique (Hahne et al., 2004) et la présentation visuelle des mots (Holcomb et al., 1992) auraient pour effet de mettre en évidence les différences liées au développement sur le plan de l'amplitude et de la latence respectivement. Au point de vue de la distribution topographique, l'activation tend à se concentrer sur les électrodes centro-pariétales avec l'âge (Byrne et al., 1999; Holcomb et al., 1992).

4.3 Conclusions

En résumé, les mesures électrophysiologiques présentent plusieurs caractéristiques dont il sera possible de tirer avantage afin d'étudier les différentes questions de recherches soulevées par la revue de littérature quant aux effets aigus et chroniques de l'exercice physique. En outre, l'analyse spectrale de l'EEG permettra de cerner les modifications quant à l'état de vigilance de l'enfant suite à un exercice physique et ainsi mieux comprendre la durée des effets aigus. En ce qui a trait aux ERP, les composantes qui seront étudiées reflètent des processus cognitifs variés en plus d'être sensibles au développement et à l'exercice physique. Enfin, les générateurs de ces composantes sont distribués dans différentes régions du cerveau, qui sont elles-mêmes l'objet de certaines des hypothèses présentées en lien avec les effets chroniques de l'exercice physique. Les mesures électrophysiologiques permettront non seulement d'examiner les processus cognitifs modulés par l'exercice

physique, mais aussi d'intégrer les résultats aux différentes hypothèses postulées dans la littérature.

CHAPITRE 5

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

5.1 Questions de recherche et hypothèses

L'objectif général de cette thèse est d'explorer les conséquences de l'exercice physique sur les mécanismes neurophysiologiques qui sous-tendent le fonctionnement cognitif chez l'enfant. De ce fil conducteur découleront trois études qui auront des objectifs spécifiques en lien avec les principales problématiques qui ont été mises en évidence par la revue de littérature sur les effets aigus et chroniques de l'exercice physique. Les questions de recherche de chacune des trois études ainsi que leurs hypothèses sont détaillées ci-dessous.

Étude 1

Objectifs. Examiner l'impact d'une séance d'exercice physique d'intensité moyenne sur O1) l'activité cérébrale spontanée du garçon et O2) cerner la durée des effets à l'intérieur d'une fenêtre de temps de 30 min.

Hypothèses. H1) L'exercice physique induira des changements au niveau de la bande alpha qui est la fréquence dominante chez un individu au repos. Les modifications attendues reflèteront un état de vigilance accru et H2) dureront au moins 25 min.

Étude 2

Objectifs. À l'aide d'une tâche d'« *oddball* », déterminer si l'effet aigu d'un exercice physique d'intensité moyenne est modulé par O1) la demande cognitive de la tâche et O2) l'âge des participants.

Hypothèses. H1) L'exercice physique aura un impact plus important sur la composante P3b que sur la composante Nc, car elle (P3b) reflète un processus

cognitif relativement plus complexe que la Nc. H2) Les effets de l'exercice physique seront plus grands chez les plus jeunes participants puisque les composantes étudiées ne sont pas complètement matures. Celles-ci pourront donc profiter d'un plus grand potentiel d'amélioration.

Étude 3

Objectifs. Examiner les bienfaits de l'aptitude aérobie sur le fonctionnement cognitif révélés par les études transversales à l'aide d'un devis quasi-expérimental en évaluant l'effet d'un programme d'activités physiques sur O1) l'aptitude aérobie et O2) la composante P3b et la mémoire à long terme. O3) Vérifier la relation entre la pratique d'activités physiques d'intensité élevée et l'amélioration du fonctionnement cognitif.

Hypothèses. Le programme d'activités physiques sera bénéfique à H1) l'aptitude cardiovasculaire des participants et H2) aux composantes étudiées en lien avec la mémoire de travail (P3b) et la mémoire à long terme (N400). H3) La pratique d'activités physiques d'intensité élevée sera associée à l'amélioration cognitive.

5.2 Article 1

The effect of acute exercise on brain activation in children

The effect of acute exercise on brain activation in children

Mathilde St-Louis-Deschênes^{1,2} and Dave Elleberg^{1,2}

¹Université de Montréal, Département de kinésiologie

²Centre de Recherche en Neuropsychologie et Cognition

En préparation

Abstract

The present study examined the effect of a single session of moderate exercise on brain activation in children. Twelve 9- to 11-year-old boys pedaled for 36 min on a cycle ergometer at a moderate intensity. Electrophysiological activity was recorded before exercise, 10, 20, and 30 min post-exercise. The results indicate that relative spectral power in the alpha1 band (8-10 Hz) decreased from 10 to 20 min post-exercise and that relative spectral power in the alpha2 band (10-12 Hz) increased 20 and 30 min post-exercise when compared to pre-exercise measurements. These concomitant changes that occurred in the alpha1 and in the alpha2 bands suggest a higher level of vigilance, and this is usually associated with a general improvement in cognitive performance. The present results also suggest that a single session of moderate exercise produces physiological changes in the brain that last at least 30 min post-exercise.

Keywords: quantitative EEG, alpha band, physical activity, cognition, boys

Introduction

A single session of exercise improves cognitive functioning in children (Caterino & Polak, 1999; Elleberg & St-Louis-Deschênes, 2010; Hillman, et al., 2009; Pesce, Crova, Cereatti, Casella, & Bellucci, 2009). The exercise parameters that lead to such an improvement typically embrace a time window of 15 to 50 min (Caterino & Polak, 1999; Gabbard & Barton, 1979) and an intensity of 55 to 70 % of maximal heart rate (HRmax) (Hillman, et al., 2009; McNaughten & Gabbard, 1993; Pesce, et al., 2009). These results agree with the adult literature suggesting that a sub maximal steady-state exercise ranging from 20 to 60 min facilitates numerous cognitive processes (Tomprowski, 2003).

Little is known about the duration of the cognitive improvements measured after a single session of exercise. In most studies, cognitive measurements were completed within 5 min after exercise (Caterino & Polak, 1999; Gabbard & Barton, 1979; McNaughten & Gabbard, 1993; Raviv & Low, 1990) and at only one time point (Caterino & Polak, 1999; Gabbard & Barton, 1979; Hillman, et al., 2009; McNaughten & Gabbard, 1993; Raviv & Low, 1990; Zervas, Danis, & Klissouras, 1991). Even though this was not systematically investigated, there is some evidence that the effect acute of exercise lasts at least 25 min after exercise cessation. For example, Pesce and collaborators (2009) found that memory was improved 15 min post-exercise when compared to baseline and Zervas et al. (1991) reported better decision making 15 min post-exercise. Further, using event-related potentials, Hillman and collaborators (2009) found greater executive control 25 min post-exercise.

Some authors suggest that improvements in cognitive performance following exercise are mediated by an increase in arousal (Audiffren, 2009; Tomprowski, Davis, Miller, & Naglieri, 2008). Recording spontaneous cerebral activity with an EEG can assess arousal. The EEG can be decomposed by spectral analysis in six main frequency bands (delta: 0-4 Hz, theta: 4-8 Hz, alpha1 8-10 Hz, alpha2 10-12 Hz, beta1 12-20 Hz and beta2 20-30 Hz). A certain degree of functional significance has been attributed to each band. For example, increased energy within the slow bands

such as delta, theta and alpha1 most likely reflects sleep (Niedermeyer, 2005b), drowsiness (Klimesch, 1999; Niedermeyer, 2005b) and fatigue (Cajochen, Brunner, Krauchi, Graw, & WirzJustice, 1995), whilst increased energy within the faster bands such as alpha2, beta1 and beta2 is usually associated with good cognitive performance (Fonseca, Tedrus, Chiodi, Cerqueira, & Tonelotto, 2006) and alertness (Niedermeyer, 2005a). Moreover, it is generally accepted that a reduction of power in the slower bands combined with an increase in power in the faster bands reflects an improvement in vigilance (Niedermeyer, 2005a). Using electrophysiology, Schneider and colleagues (2009) measured an increase in alpha in eleven 9- to 10-year-olds 15 min after moderate exercise that they interpreted as an augmentation in the state of relaxation.

The purpose of the present study was to 1) investigate the acute effect of moderate exercise on brain activity during childhood and 2) monitor these changes over a post-exercise period of 30 min (10, 20, and 30 min post-exercise). An advantage of this method over behavioural measures is that it allows for repeated testing as it is not affected by learning or practice effects. Because a previous study reported an increase in alpha activity after exercise (Schneider, et al., 2009) and because of the known relationship between the alpha2 band and cognitive performance (Fonseca, et al., 2006), we predicted that power within the alpha2 band will increase after exercise cessation. Further, according to the results obtained by Hillman and collaborators (2009) we predict that the effect of acute exercise on brain activity will be present at least up to 25 min after exercise.

Method

Participants

Seventeen 9 and 11 year-old boys were recruited. Only boys were included because of known gender difference in the development of EEG responses (Clarke, Barry, McCarthy, & Selikowitz, 2001). Data from five participants were discarded: four did not complete the experiment, two because of a lack of collaboration and two others because the electrodes did not remain on the scalp during the exercise; another

participant's data were contaminated with muscle artifacts. The 12 participants whose data were included in the analyses had a mean age of 10.83 ($SD = 0.74$) years, a height of 1.45 ($SD = 0.07$) m, a weight of 37.17 ($SD = 5.81$) kg, and a body mass index (BMI) of 17.64 ($SD = 2.08$) kg/m². This number of participants is similar to the sample size reported in Schneider and collaborators (2009) using a similar experimental procedure. All participants were free of neurological disorders, learning disabilities, and history of head injury. The study was approved by the ethics committee for research in health sciences of the University of Montreal.

Materials and Procedure

Experimental procedures took place on the same day and lasted about two and a half hours. After being familiarised with the experimental context and equipment, the participants were comfortably seated as they underwent the installation of the electrodes. Following electrode placement, baseline EEG activity with eyes closed was recorded for 3 min. Then, participants completed 36 min of exercise on a cycle ergometer. After the exercise, EEGs activity was recorded with eyes closed at three different times: 10, 20, and 30 min post-exercise. Between the recordings, the children remained seated in the testing room and the experimenter verified the impedances.

Exercise. Exercise was performed on a cycle ergometer (Ergomeca GP 440, La Bayette, France) and exercise intensity was continuously monitored with a heart rate (HR) monitor (Polar Electro, Oy, Finland). During the three min warm up, the workload was increased progressively until the participant reached an intensity ranging from 55 to 70% of his age predicted HRmax (115-150 bpm). Participants were encouraged to maintain target intensity for 30 min and HR was measured every five min. The mean HR reached for the group averaged throughout the exercise was 137.00 ($SD = 5.67$) bpm, a mean intensity that corresponds to those from previous studies (Elleberg & St-Louis-Deschênes, 2010; Hillman, et al., 2009; Pesce, et al., 2009). The session ended with a three min cool down to return HR below 100 bpm.

EEG recording. Before the electrodes placement, Nuprep gel (Weaver & Co., Aurora, CO, USA) was applied to the scalp to reduce skin impedance. Electrodes were fixed on the scalp with Ten20 conductive paste (Weaver & Co., Aurora, CO, USA). Data were recorded from eight gold disc electrodes (Grass Product Group, West Warwick, RI, USA). All impedances were kept below 10 k Ω before each of the four recordings. Data were recorded according the 10-20 system at F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, and O2. All electrodes were referenced to earlobes (A1, A2) and a ground electrode was placed at Fz. Two additional electrodes (F7, F8) were used to detect blinks and ocular movements. All EEG recordings were made whilst the subject sat comfortably on a chair in an electromagnetic isolated room. The EEG signal was amplified 20 000 times with the Neurodata amplifier system model 15A54 (Grass-Telefactor, West Warwick, RI, USA). High and low pass filters were set at 0.01 and 100 Hz (-6 dB), respectively. The signal was digitalized at 256 Hz and the data were recorded with Gamma software (Grass-Telefactor, West Warwick, RI, USA).

Data Analysis

Analyses were performed with Brain Vision Analyzer version 1.05 (Brain Products GmbH, Munich, Germany). High and low pass filters were set at 1 and 40 Hz (24 dB/octave), respectively. For each three min of recording, the first 30 s were rejected to avoid measuring activity associated to a change in state. The remainder of the data were segmented in 150 epochs of 1 s. Segment overlap was not allowed. Semi-automatic artifact rejection was performed on each segment using the following criteria: the absolute difference between two sampling points or between the maximum and the minimum could not exceed 150 μ V; the amplitude could not exceed 150 μ V or fall below -150 μ V; and the difference between an interval of 100 ms could not be lower than 0.5 μ V. This threshold was chosen to avoid rejection of high amplitude alpha. To standardize the signal to noise ratio 60 artifact-free epochs were randomly selected for the analyses. Fast Fourier Transformation with a 10 % Hanning window was performed on each segment to determine spectral power (μ V²) and averaged for the following frequency bands: delta (1–4 Hz), theta (4–8 Hz), alpha1 (8–10 Hz), alpha2 (10–12 Hz), beta1 (12–20 Hz), and beta2 (20–

30 Hz). To normalize the distribution of the data, the mean absolute power for each electrode and for each frequency band was converted to relative power.

Statistical Analyses

A 4 X 6 X 4 X 2 (Time of Recording X Frequency Band X Scalp Region X Laterality) ANOVA with repeated measures on all four factors was conducted to determine if there were any differences in spectral power after exercise relative to the baseline. Post-hoc analyses adjusted with Bonferroni's corrections were applied to the interactions including the factor Time of Recording. An alpha level of .05 was used for all statistical tests.

Results

Changes in relative spectral power for each frequency band according to time of recording are presented in Figure 5.1. The statistical analyses did not reveal any 3- or 4-way interactions. There was a Time of Recording X Frequency Band interaction $F(3.84, 42.25) = 3.73, p = .01, \eta^2 = .25$ and a Frequency Band X Scalp Region interaction $F(2.79, 30.69) = 16.59, p < .01, \eta^2 = .60$. Because of our particular interest for the effect of time, post-hoc analyses were performed on the Time of Recording X Frequency Band interaction. They revealed an effect of time for alpha1 and alpha2 bands. No significant effects were found for any of the other frequency bands ($ps > .05$). More precisely, relative spectral power decreased significantly for alpha1 from 10 min ($M = 24.52, SD = 9.13$) to 20 min post-exercise ($M = 21.92, SD = 8.08$), $t(11) = 3.70, p < .02, d = .30$. Although not significant ($p = .18$), relative spectral power for alpha1 tended to remain at 30 min post-exercise when compared to 10 min post-exercise (see Figure 5.1). For the alpha2 band, relative power significantly increased 20 min ($M = 17.96, SD = 8.14$) and 30 min post-exercise ($M = 17.47, SD = 7.30$), relative to the pre-exercise measurement ($M = 15.70, SD = 7.43$), $t(11) = 3.34, p = .04, d = .29$ and $t(11) = 3.35, p = .04, d = .24$. The results of the analyses suggest that the effect of exercise on brain activity is specific to alpha and lasts at least up to 30 min post-exercise. Further, the absence of triple interactions suggests a global effect of exercise which is not specific to a particular region or hemisphere.

Insert Figure 5.1 about here

Discussion

The present study investigated the effect of moderate exercise on brain activity in boys and monitored these changes over a period of 30 min. To do so, spontaneous brain activity was recorded immediately prior to the exercise, 10, 20, and 30 min post-exercise. Relative spectral power for alpha1 (8–10 Hz) was reduced 20 min post-exercise and for alpha2 (10–12 Hz) it was elevated 20 and 30 min post-exercise.

In agreement with our hypothesis, changes were found only for the alpha range and not the other bands. Similar results were reported by Schneider et al., (2009) who found an increase in power for alpha after a group of pre-adolescents exercised for 15 min. In the present study, the subdivision of the alpha frequency into higher and lower sub-bands revealed concomitant changes occurring within the alpha1 and the alpha2 bands. The concomitant reduction in power for slower waves with the increase in power for faster waves is interpreted as an improvement in vigilance (Niedermeyer, 2005a) and relative spectral power in alpha2 is positively correlated with verbal, performance and global intellectual quotient in children on the Wechsler Intelligence Scale for Children III (WISC III) (Fonseca, et al., 2006).

The lack of an effect of exercise at 10 min post-exercise was not expected considering that behavioural studies show an immediate effect (Caterino & Polak, 1999; Gabbard & Barton, 1979; McNaughten & Gabbard, 1993; Pesce, et al., 2009). However, our protocol differed slightly in terms of its experimental procedure. Some studies also included social interactions and cognitive demands in addition to the acute exercise (Gabbard & Barton, 1979; Pesce, et al., 2009), which can modulate the immediate effect of exercise on cognitive processes (Pesce, et al., 2009). Further, the changes in spontaneous brain activity measured in the present study are not

necessarily related to the mechanisms underlying the behavioural tasks used in previous studies.

Another goal was to verify the duration of the effect of a single session of exercise. We observed greater EEG relative spectral power for the alpha2 band 30 min post-exercise relative to baseline. This is consistent with previous findings and extends our knowledge about the time window over which, the effects of exercise operate on the brain. The effect of acute exercise on memory and decision making persists at least up to 15 min after exercise cessation (Pesce, et al., 2009; Zervas, et al., 1991) and an improvement in cognitive control was observed 25 min after exercise cessation (Hillman, et al., 2009).

The identification of the underlying processes responsible for the immediate effect of exercise on brain activity remains hypothetical. First, animal research indicates that brain catecholaminergic activity (dopaminergic and noradrenergic) is increased during exercise (Gerin & Privat, 1998; Meeusen & Demeirleir, 1995; Meeusen, et al., 1997). These pathways are important regulators of alertness and vigilance and can be responsible for decreasing power within the alpha1 band and increasing power within the alpha2 band. A second hypothesis concerns cerebral blood flow and oxygenation. An increase in regional cerebral blood flow and in brain oxygenation induced by exercise (Ide & Secher, 2000; Timinkul, et al., 2008) can contribute to a higher state of vigilance. Clearly, future studies will need to investigate the potential underlying mechanisms responsible for the exercise-induced changes in brain activation.

It could be argued that the modifications in EEG activity observed 20 and 30 min after exercise are the result of passage of time alone. However, this is unlikely given that none of the frequencies investigated in the present experiment is modified by the passage of time alone during spontaneous EEG recording (Barry, Clarke, Johnstone, Magee, & Rushby, 2007). Finally, our findings concerning the effect of exercise on brain activity are limited to 30 min post-exercise; however, it is possible that this effect lasts longer. This will need to be investigated in future experiments.

References

- Audiffren, M. (2009). Acute exercise and psychological functions: a cognitive-energetic approach. In T. McMorris, P. D. Tomporowski & M. Audiffren (Eds.), *Exercise and cognitive function* (pp. 3-39). Chichester: Wiley-Blackwell.
- Barry, R. J., Clarke, A. R., Johnstone, S. J., Magee, C. A., & Rushby, J. A. (2007). EEG differences between eyes-closed and eyes-open resting conditions. *Clin. Neurophysiol.*, 118, 2765-2773.
- Cajochen, C., Brunner, D. P., Krauchi, K., Graw, P., & WirzJustice, A. (1995). Power density in theta/alpha frequencies of the waking EEG progressively increases during sustained wakefulness. *Sleep*, 18, 890-894.
- Caterino, M. C., & Polak, E. D. (1999). Effects of two types of activity on the performance of second-, third-, and fourth-grade students on a test of concentration. *Percept. Mot. Skills*, 89, 245-248.
- Clarke, A. R., Barry, R. J., McCarthy, R., & Selikowitz, M. (2001). Age and sex effects in the EEG: Development of the normal child. *Clin. Neurophysiol.*, 112, 806-814.
- Ellemborg, D., & St-Louis-Deschênes, M. (2010). The effect of acute physical exercise on cognitive function during development. *Psychology of Sport and Exercise*, 11, 122-126.
- Fonseca, L. C., Tedrus, G., Chiodi, M. G., Cerqueira, J. N., & Tonelotto, J. M. F. (2006). Quantitative EEG in children with learning disabilities: Analysis of band power. *Arq. Neuropsiquiatr.*, 64, 376-381.
- Gabbard, C., & Barton, J. (1979). Effects of physical-activity on mathematical computation among young-children. *J. Psychol.*, 103, 287-288.
- Gerin, C., & Privat, A. (1998). Direct evidence for the link between monoaminergic descending pathways and motor activity: II. A study with microdialysis

- probes implanted in the ventral horn of the spinal cord. *Brain Res.*, 794, 169-173.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., & Kramer, A. F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159, 1044-1054.
- Ide, K., & Secher, N. H. (2000). Cerebral blood flow and metabolism during exercise. *Prog. Neurobiol.*, 61, 397-414.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res. Rev.*, 29, 169-195.
- McNaughten, D., & Gabbard, C. (1993). Physical exertion and immediate mental performance of 6th-grade children. *Percept. Mot. Skills*, 77, 1155-1159.
- Meeusen, R., & Demeirleir, K. (1995). Exercise and brain neurotransmission. *Sports Med.*, 20, 160-188.
- Meeusen, R., Smolders, I., Sarre, S., Meirleir, K. D., Keizer, H., Serneels, M., Ebinger, G., & Michotte, Y. (1997). Endurance training effects on neurotransmitter release in rat striatum: an in vivo microdialysis study. *Acta Physiol. Scand.*, 159, 335-341.
- Niedermeyer, E. (2005a). The normal EEG of the waking adult. In E. Niedermeyer & F. Lopes da Silva (Eds.), *Electroencephalography : Basic principles, clinical applications and related fields* (5th ed., pp. 167-192). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Niedermeyer, E. (2005b). Sleep and EEG. In E. Niedermeyer & F. Lopes da Silva (Eds.), *Electroencephalography : Basic principles, clinical applications and related fields* (5th ed., pp. 193-207). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.

- Pesce, C., Crova, C., Cereatti, L., Casella, R., & Bellucci, M. (2009). Physical activity and mental performance in preadolescents: Effects of acute exercise on free-recall memory. *Mental Health and Physical Activity*, 2, 16-22.
- Raviv, S., & Low, M. (1990). Influence of physical-activity on concentration among junior-high-school students. *Percept. Mot. Skills*, 70, 67-74.
- Schneider, S., Vogt, T., Frysch, J., Guardiera, P., & Strüder, H. K. (2009). School sport—A neurophysiological approach. *Neurosci. Lett.*, 467, 131-134.
- Timinkul, A., Kato, M., Omori, T., Deocarís, C. C., Ito, A., Kizuka, T., Sakairi, Y., Nishijima, T., Asada, T., & Soya, H. (2008). Enhancing effect of cerebral blood volume by mild exercise in healthy young men: A near-infrared spectroscopy study. *Neurosci. Res.*, 61, 242-248.
- Tomporowski, P. D. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychol. (Amst.)*, 112, 297-324.
- Tomporowski, P. D., Davis, C. L., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2008). Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Educational Psychology Review*, 20, 111-131.
- Zervas, Y., Danis, A., & Klissouras, V. (1991). Influence of physical exertion on mental performance with reference to training. *Percept. Mot. Skills*, 72, 1215-1221.

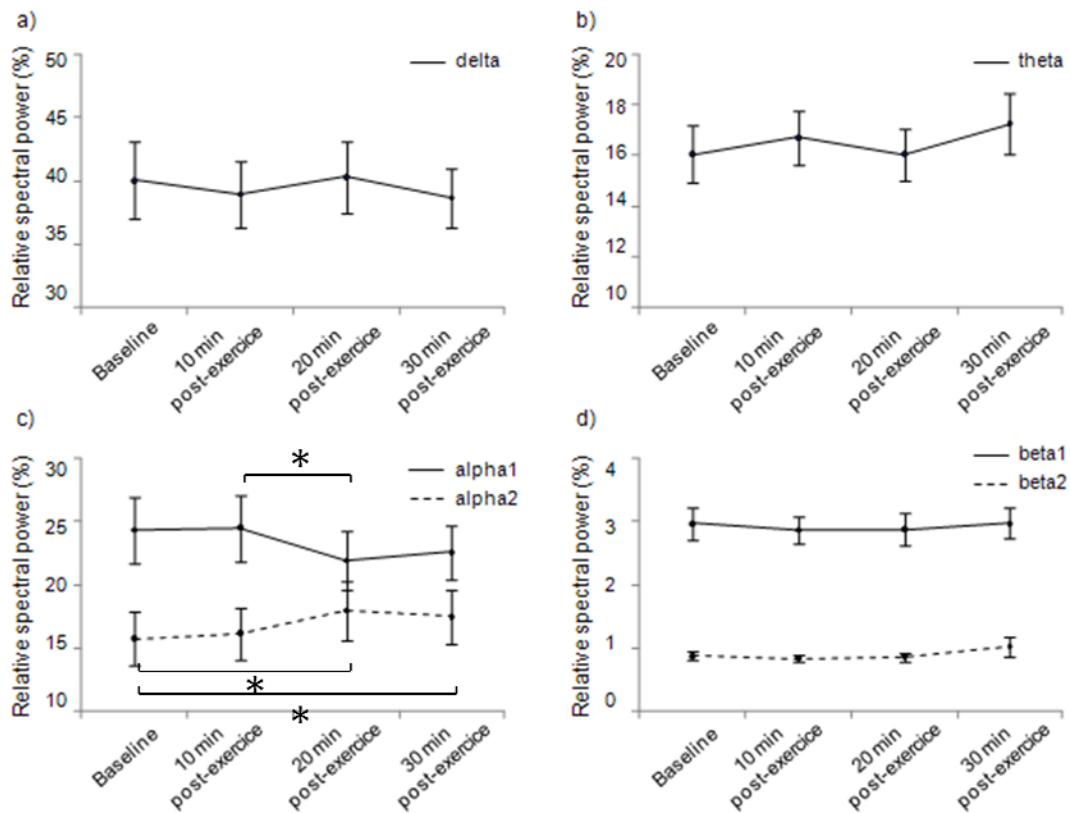


Figure 5.1. Mean EEG relative power and standard error at four time points (baseline, 10, 20, and 30 min post-exercise) for a) delta, b) theta, c) alpha1 and alpha2, d) beta1 and beta2 frequency bands.

5.3 Article 2

***Acute exercise and electrophysiological indices of cognition
during development***

Acute exercise and electrophysiological indices of cognition during development

Mathilde St-Louis-Deschênes^{1,2} and Dave Elleberg^{1,2}

¹Université de Montréal, Département de kinésiologie

²Centre de Recherche en Neuropsychologie et Cognition

En préparation

Abstract

Accumulating evidence suggests that acute physical exercise is beneficial across a range of complex cognitive functions in children. However, it remains to be determined whether the effect of a single session of exercise also varies with the cognitive demand of the task and age. To examine those questions event-related potentials evoked by a 3-stimulus visual oddball task were recorded in 8-9 ($n = 16$) and 11-12 year-old ($n = 16$) children. Two neurophysiological components, each reflecting different levels of processing complexity were studied (viz., Nc and P3b). The Nc reflects relatively simple cognitive processes associated with attention capture, whilst the P3b reflects complex cognitive processes associated with updating information in working memory. On separate days, each child was tested once without previously experiencing physical exercise and once after pedaling for 30 min at a moderate intensity (approximately 150 bpm) on a cycle ergometer. The results indicate that the mean amplitude of the P3b was significantly greater immediately after physical exercise ($p < .05$) for all midline electrodes (Cz, CPz and Pz) and equally so for both age groups. No significant change was observed for the latency of the P3b and there was no effect of exercise for either the mean amplitude or the latency of the Nc. The present findings suggest that the effect of acute physical exercise on children's cognition is influenced by the cognitive demand of the task. An acute session of physical exercise has a beneficial influence on complex cognitive processes such as those related to working memory but not on more simple processes such as those related to attention capture.

Keywords: physical activity, children; event-related potentials (ERPs); P3b, Nc

Introduction

The school environment provides multiple opportunities for pupils to be physically active during the day (e.g., recess, physical education classes, daycare and extracurricular activities). A meta-analysis reviewing studies that investigated the effect of physical exercise on children's cognition revealed that the overall effect is small, positive and observed across a range of cognitive functions (33). An acute bout of physical exercise is beneficial for children's cognitive functions such as decision making (10, 40), cognitive control (14), and memory (26). A better understanding of the effect of acute exercise on cognition and its underlying mechanisms could contribute to the elaboration of recommendations geared at improving the pupils' learning.

There is some evidence suggesting that acute exercise more strongly influences performance on tasks that have a greater cognitive demand. Indeed, Hillman and collaborators (14) examined, in preadolescents, flanker task performance after walking 20 min on a treadmill at a moderate intensity (66 % of HRmax). The flanker task assesses different levels of inhibitory control as the target can be congruent with surrounding information which facilitates information processing or incongruent which requires inhibition of surrounding information. Behavioural performance and neurophysiological indices of inhibitory control, as assessed by the P3, were increased after exercise. Furthermore, the effect of exercise was greater for trials requiring more inhibitory control. Similarly, Ellemberg and St-Louis-Deschenes (10) found that the amelioration in reaction time following acute exercise was 2.2 times greater for a choice reaction time task compared to a simple reaction time task. In that experiment, the simple reaction time task tapped low-level sensori-motor functions whereas the choice reaction time task involved decision making processes.

The cognitive demand of the task might not be the only variable to interact with the relationship between exercise and cognition. Tomporowski and collaborators (37) pointed out in their review of the literature that the effect of exercise on cognition might be influenced by the participant's age and cognitive development. Effectively, there might be more room for improvement for cognitive processes that

are still undergoing maturation compared to those that are fully mature. Only a few studies investigated different age groups of children, and their results were equivocal. Caterino and Polak (3) found that 15 min of aerobic walking and stretching improved concentration only in 4th grade students and not in 2nd or 3rd grade students. However, research investigating the effects of acute exercise with 7- and 10-year-olds boys found that the influence of exercise on a decision making task was similar for both age groups (10).

The nature, intensity, and duration of the exercise are parameters that also likely influence its relationship with cognition. In the literature, improvements of cognitive functions were found for physical exertion that varies from exercising on an ergometer in a laboratory setting (14) to team sports occurring in a physical education class (26). Exercise duration ranges from 15 (3) to approximately 40 min (26), and intensity ranges from walking at low to moderate intensity (14) to running at high intensity (40). Thus, in the laboratory setting, it seems reasonable to expect beneficial effects on cognition following an exercise session of moderate intensity lasting approximately 30 min.

ERPs are frequently used to investigate the effect of acute exercise on neurophysiological processes underlying certain aspects of cognition in adults (13, 15, 18, 24). This technique presents two major advantages over traditional behavioural measures. First, it provides a continuous assessment of the stages of information processing that occur from stimulus presentation to response selection. Second, it allows for the assessment of stimulus processing even if no overt response is required.

One of the most frequently studied components with the ERP is the P3, also known as P3b. It is an endogenous component usually elicited by an infrequent and unpredictable stimulus embedded in a sequence of frequent and predictable stimuli (i.e., an oddball paradigm). The amplitude of the P3b reflects the relatively complex neurocognitive process associated with the allocation of neuronal resources involved in updating information in working memory (8, 27) whilst its latency indexes stimulus classification speed (21, 22). According to neuropharmacological research, the

P3b appears to be related to the locus coeruleus and the noradrenergic system (8, 27). The development of the P3b is typically characterised by a shortening of its latency (4, 11). This component seems to be fully mature at some point between late adolescence (11) and early adulthood (4).

Also belonging to the P3 family is the P3a. In adults, this component is typically elicited by the addition of a third stimulus category to the oddball sequence, which is infrequent, unpredictable, and context divergent (28, 32). However, in children, a 3-stimuli visual oddball paradigm typically elicits a frontal negativity (Nc) rather than a positivity (P3a) (4, 20, 35). The Nc component reflects the relatively automatic and less complex process of attention capture (4, 5). Although speculative, it is hypothesised to be triggered by cholinergic input to the cortex (5, 6). The Nc, which is the first endogenous component to appear during development, can be elicited in 6 month old infants (19). The Nc exhibits a reduction in amplitude and latency from childhood to adolescence (4, 20).

The goal of the present study was to assess whether the effect of acute physical exercise on cognition is influenced by the cognitive demand of the task and cognitive development. To do so, we investigated the impact of an acute session of physical exercise on two neurophysiological components of the ERP reflecting different cognitive demands (Nc and P3b) in two age groups of children (8-9 and 11-12 year-olds). Because the effect of exercise seems to be stronger for tasks requiring higher cognitive demands, it was hypothesised that the increase in amplitude following exercise will be greater for the P3b than the Nc. Moreover, given that the processes examined in this study are not yet fully mature, we hypothesised that the benefits will be greater for the younger compared to the older age group.

Methods

Participants

This study included thirty-two children equally divided in two age groups: 8-9 year-olds and 11-12 year-olds. Thirty-one were right handed. All participants had normal or corrected to normal vision, were free of neurological disorders, learning

disabilities and history of head injury; this was verified by means of a questionnaire completed by the parent. Participants' demographic and fitness data are provided in Table 5.I. Each participant's parent read and signed an informed-consent approved by the *Comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé of the Université de Montréal*. Each child provided verbal assent.

Insert Table 5.I about here

Procedure

Each participant visited the laboratory on three separate days. During the first visit, maximal aerobic power (MAP) was determined with a graded maximal test. First and second visits to the laboratory were always separated by a minimum of 48 hr to avoid any possible after-effect caused by the maximal test. There was a baseline condition which consisted of completing a 3-stimuli visual oddball task without prior physical activity. This took place during the second visit for half of the children and during the third visit for the remaining half. The exercise condition consisted in pedaling for 30 min at moderate intensity and then completing the same visual oddball task immediately after the exercise. The second and third visits were separated by an average of 6.56 days ($SD = 8.83$). For each participant, the oddball task was always performed at the same moment of the day. Half of the participants were tested in the morning whereas the other half was tested in the afternoon.

MAP

MAP was determined by the McMaster protocol and was assessed for each participant to individualise the exercise session according to participant's own level of fitness. This test is specially designed for a paediatric population such that the initial load and the increments vary with sex and height (2). The test was performed on a Corival V3 cycle ergometer (Lode BV, Groningen, Netherlands) and stage duration was 2 min. At the end of each stage, HR was monitored using a FS1 monitor

(Polar Electro Oy, Finland) and perceived exertion was assessed using the OMNI scale for cycle ergometer testing (31). The children's OMNI scale is a rating scale from 0 « not tired at all » to 10 « very, very tired » with pictograms. The main criteria to determine MAP were to no longer being able to maintain a pedaling rate of 55 revolutions per minute. MAP and HRmax data are provided in Table 5.I.

Sub maximal exercise

A sub maximal exercise of moderate intensity was employed as the experimental manipulation to investigate the effect of acute exercise on cognition. The exercise session was performed on a Corival V3 cycle ergometer (Lode BV, Groningen, Netherlands). Exercise intensity was continuously monitored using a FS1 monitor (Polar Electro Oy, Finland) and perceived exertion was assessed every 2 min using the OMNI scale. Table 5.I provides mean exercise HR and mean exercise rating of perceived exertion. Overall the exercise session lasted 30 min, including cycling for 22 min at an intensity corresponding to 50 % of MAP, a 5 min warm-up and a 3 min cool-down at an intensity of 25 % of MAP. Participants were encouraged to maintain a pedaling rate of 55 revolutions per minute or more during the whole exercise session. The cognitive task started approximately 10 min after the end of the exercise session.

Cognitive task

The task employed to evaluate cognitive processing was a 3-stimuli visual oddball. The stimuli consisted of white rectangles (2.5 cm wide and 8.5 cm long) on a black background (16). The standard stimulus was vertical (.76 probability), the target was slightly tilted from vertical (.12 probability), and the salient non target was horizontal (.12 probability). To ensure the same level of task difficulty for the two age groups, the angle of tilt was determined in a pilot study ran on a different group of children. For the younger group, the target was tilted 3° from vertical whereas for the older group it was tilted 2.5° from vertical. These parameters allow for an error rate that ranges between 10-15% for both age groups. The interstimuli interval ranged from 1600 to 2000 ms and stimulus duration was 70 ms.

All recordings were made whilst the subject sat comfortably on a chair in a dimly light electromagnetic isolated and sound attenuated room. The distance between the participant's eyes and the centre of the computer screen was 1 m. All participants received the instruction to respond as fast as possible with the index finger of their dominant hand when the target stimulus appeared. However, they were asked to place emphasis on accuracy rather than speed. A 15 trial practice session was provided to ensure that each participant understood and could complete the task. The task consisted of 3 blocks of 169 stimuli each. Rest periods of 2 min were provided between each block. The task lasted on average 22 min including rest periods.

EEG

EEG were recorded using a 128-electrode Geodesic Sensor Net (EGI, Eugene, OR, USA) (38). Electrode impedance was kept below 50 k Ω , which is an acceptable level for high input impedance amplifiers (38) and each electrode was referenced to Cz. The EEG signal was amplified with Net Amps 200 amplifier (EGI, Eugene, OR, USA) and a band-pass filter was set at 0.1-100 Hz. The signal was digitalized at 250 Hz and the data were recorded with Net Station software (EGI, Eugene, OR, USA). To reduce skin impedance the scalp was cleaned with Nuprep gel (Weaver & Co., Aurora, CO, USA) and an alcohol pad (PDI, Orangeburg, NY, USA).

Data Analysis

Offline data reduction was performed with Brain Vision Analyzer version 1.05 (Brain Products GmbH, Munich, Germany). High and low pass filters were set at 0.1 and 30 Hz (24 dB/octave), respectively. Eye movements were corrected with the Gratton and Coles algorithm (12). Data were re-referenced to average mastoids and semi-automatically inspected to mark EEG activity exceeding $\pm 100 \mu\text{V}$. The EEG was segmented in 1400 ms epochs, with each epoch beginning 200 ms before stimulus onset. A local DC trend correction and a baseline correction within the pre-stimulus interval were applied to the segments. Before averaging, trials for which participants gave an incorrect response or with a reaction time exceeding $\pm 2.5 SD$

were rejected. The P3b component was measured over a time window of 450-700 ms. The mean amplitude of the P3b was determined over midline, left, and right hemispheres of the centro-parietal region (i.e., C3, Cz, C4, CP3, CPz, CP4, P3, Pz, P4), whilst its latency was determined at Pz, which is the scalp location corresponding to the maximal positive deflection. The Nc component was assessed over a time window of 350-500 ms. The mean amplitude of the Nc was measured over midline, left, and right hemispheres of the frontal region (i.e., Fp1, Fpz, Fp2, AF3, Afz, AF4, F3, Fz, F4) and its latency was determined at Afz, which is the scalp location corresponding to the maximal negative deflection.

Statistical Analyses

For behavioural variables, separate analyses were conducted on response accuracy for each stimulus category and on target stimulus reaction time. A mixed model ANOVA 2 (Age Group: 8-9 and 11-12 year-olds) X 2 (Condition: baseline and exercise) was used. This was done to determine if there were any differences in response accuracy or reaction time according to age and condition for a given stimulus category. For ERPs, separate analyses were conducted on the mean amplitude and the latency of each of the two components (i.e., Nc and P3b). Latencies were submitted to a 2 (Age Group) X 2 (Condition) mixed model of ANOVA. Mean amplitudes for the P3b were analysed with a 2 (Age Group) X 2 (Condition) X 3 (Region: central, centro-parietal, parietal) X 3 (Hemisphere: 3, z, 4) mixed model of ANOVA. Mean amplitudes for the Nc were submitted to a 2 (Age Group) X 2 (Condition) X 3 (Region: pre-frontal, antero-frontal, frontal) X 3 (Hemisphere: 1/3, z, 2/4) mixed model of ANOVA. This was done to determine if there were any differences in the mean amplitude of the Nc or P3b components according to participants' age, the experimental condition, brain region or hemisphere. Within subjects effects are reported according to Greenhouse-Geisser's correction. Because of our interest for exercise and cognitive development, post-hoc analyses were conducted only on significant effects that included the factors Condition or Age Group. Confidence intervals were adjusted for multiple

comparisons with Bonferroni's correction. An alpha level of .05 was used for all statistical tests. Statistical analyses were performed with SPSS 16.0.

Results

Behavioural performance

The statistical analyses on response accuracy for the standard, target, and non target stimuli did not reveal any effect of Age Group (all $ps \geq .92$), indicating that task difficulty was similar across age. There was no effect of Condition on response accuracy or reaction time (all $ps \geq .41$) suggesting that behavioural performance on the oddball task was not affected by exercise. However, the analyses of reaction time did reveal a main effect of Age Group $F(1,30) = 5.35, p < .05, \eta^2 = .15$ with the 11-12 year-olds being faster ($M = 624.17, SD = 75.79$) than the 8-9 year-olds ($M = 693.34, SD = 92.50$), $t(30) = 2.31, p < .05, d = .82$.

ERPs

P3b mean amplitude. The mixed model ANOVA revealed a main effect of Hemisphere $F(1.82, 54.62) = 39.14, p < .001, \eta^2 = .57$ which was superseded by a two-way interaction of Condition X Hemisphere $F(1.64, 49.32) = 6.93, p < .01, \eta^2 = .19$ and a two-way interaction of Region X Hemisphere $F(2.42, 72.61) = 12.24, p < .001, \eta^2 = .29$. The decomposition of the Condition X Hemisphere interaction indicates that the mean amplitude of the P3b was greater after 30 min of exercise ($M = 11.01, SD = 7.85$), compared to the baseline condition ($M = 8.45, SD = 6.87$) over midline electrodes (i.e., Cz, CPz and Pz), $t(31) = 2.31, p < .05, d = .35$. No significant interaction was found between the factors Age Group and Condition (all $ps \geq .16$) suggesting a similar effect of exercise on the mean amplitude of the P3b, regardless of age.

P3b latency. There was no main effect of Condition and no interaction with that factor on P3b latency; however, the analyses showed a main effect of Age Group $F(1,30) = 10.05, p < .01, \eta^2 = .25$, with a shorter latency for the older group ($M = 544.00, SD = 40.14$) compared with the younger children ($M = 606.00, SD = 67.14$).

Insert Figure 5.2 about here

Nc mean amplitude. There was no main effect of Condition and no interaction with that factor on the mean amplitude of the Nc. The statistical analyses did reveal a main effect of Hemisphere $F(1.88, 56.48) = 5.89, p < .01, \eta^2 = .16$ and a nearly significant main effect of Age Group $F(1, 30) = 3.07, p = .09, \eta^2 = .09$, suggesting a tendency for the younger group to present a greater mean amplitude ($M = -2.07, SD = 4.06$) compared with the older group ($M = 0.34, SD = 4.34$).

Nc latency. There were no interactions, main effect of Condition ($ps \geq .41$) or main effect of Age Group ($ps \geq .81$).

Insert Figure 5.3 about here

Discussion

The aim of this study was to determine whether the effect of 30 min of physical exercise on cognition varies according to the cognitive demand of the task and age. To do so, 8-9 and 11-12 year-old children performed an oddball task under two experimental conditions, at baseline and approximately 10 min after exercise cessation. The results indicated that the mean amplitude of the P3b component was higher following exercise. However, no change in the latency of the P3b or the amplitude and latency of the Nc was observed. Moreover, the effect of exercise did not interact with the participants' age.

Behavioural response

No effect of age was observed for response accuracy. This suggests that task difficulty was similar for both the 8-9 and 11-12 year-olds, indicating that the task

was correctly equated for difficulty. Further, we did not observe an effect of exercise on response accuracy for the target stimulus, indicating that physical exercise did not improve visual discrimination. This finding is somewhat different from Hillman and collaborators (14) who found improved accuracy on a flanker task for incongruent trials. It is possible that physical exercise most likely influences inhibition, the process involved in the flanker task, than it does visual discrimination, the process involved in our oddball task.

The results from the present study replicate the common finding that reaction time improves with age (7, 9), as the 11-12 year-olds were nearly 100 ms faster than the 8-9 year-olds. Second, the results did not revealed any effect of exercise on reaction time. This is consistent with findings from previous studies conducted to assess the effect of acute exercise with ERP in preadolescents (14), adolescents (34) and adults (39).

ERPs

The 3-stimuli visual oddball task employed in the present experiment elicited two components that reflect different aspects of cognitive processing. The Nc is associated with attention capture, which is an automatic cognitive process, whilst the P3b reflects more complex cognitive processes, including updating information in working memory. Our results indicate that the effect of acute exercise was circumscribed to augmenting the amplitude of the P3b, without any effect on the latency of the P3b or the amplitude and latency of the Nc. This finding suggests that exercise facilitates allocation of neuronal resources involved in updating information in working memory, without any effect on stimulus classification speed. Previous studies also investigated the effect of acute exercise on the P3b component, however, using different cognitive paradigms. For example, Hillman and collaborators (14) used a modified flanker task with a group of preadolescents. Similarly, they found that the amplitude of the P3b was greater following exercise without there being any change in latency. Comparable findings were also obtained with adults (18, 24).

Our finding that the Nc is not modulated by exercise suggests that acute physical exercise does not modify attention capture which is an automatic cognitive response to a salient stimulus. Therefore, at least under the present testing conditions, it appears that the effect of exercise is influenced by the cognitive demand of the task. Similar conclusions arose from previous studies that found greater benefits for a choice reaction time task compared with a simple reaction time task (10) and for trials requiring a higher level of inhibitory control (14).

Some authors suggest that the data from studies investigating the effect of exercise on cognition should be interpreted within the context of a theoretical framework in order to propose putative 'sites' of action (for a review see (1)). The present results are consistent with Kahneman's cognitive-energetic model (17) and Norman and Bobrow performance-resource function (25). According to Kahneman, physical exercise is an arousing stimulator for the organism which in turn regulates the amount of available attentional resources (i.e., an involuntary control of attention). However, not all cognitive processes necessarily benefit equally from the arousing influence of exercise. Resource-limited processes benefit from an increase in processing resources, whereas data-limited processes are independent of processing resources. Specifically, the model proposes that tasks that are more complex or that involve a greater cognitive demand, like that associated with the P3b, require more attention resources to be performed and benefit more from exercise induced arousal. This could explain why the P3b, which is associated with the demanding process of updating information in working memory, is more affected by exercise than the Nc, which is associated with the fairly automatic process of attention capture.

Also consistent with an arousal-based interpretation of the present results, is the finding that catecholamines (noradrenaline and dopamine) are released following acute physical exercise and that this likely plays a role in increasing arousal (23). Indeed, neuropsychological and neuropharmacological studies suggest that the P3b is associated with the integrity of the temporo-parietal junction and the locus coeruleus and depends on the noradrenergic system (27, 29), whereas the Nc is hypothesised to

be generated by the frontal lobe (30) and triggered by cholinergic input to the cortex (5, 6).

Another goal of the present study was to assess the effect of acute exercise on children's cognition and its relationship with age. Although participant's age did not interact significantly with exercise it is worth mentioning that the mean change in amplitude for the P3b over the midline electrodes was nearly four times greater for the younger compared to the older group. Compared to their baseline condition, 8-9 year-olds experienced an increase in amplitude of 4.0 μV , compared to an increase of 1.1 μV for the 11-12 year-olds. This suggests that the younger age group could have at least in part, driven the effect of exercise observed in the present experiment. Conversely, Caterino and Polak (3) found greater benefits for 4th grade students compared to 2nd and 3rd graders, whereas two other studies did not find any difference between 7 and 10 year-olds (10) or 7-8 and 9-11 year-olds (36). Therefore, the results on the relationship between acute exercise and age remain equivocal and certainly require further investigation.

The present study is submitted to some limitations. First, the interpretation of the data which is based on the cognitive demand of the task is limited to only two ERP components. Investigation of a wider range of cognitive processes could clarify the understanding of the interaction between acute exercise and cognition. Further, the exercise condition was compared to a resting condition. We ignore whether a cognitive controlled condition such as reading a book or playing video games would have led to the same benefits as physical exercise.

In conclusion, the positive effect of exercise on cognitive functioning was still observable even if the task, which lasted approximately 22 min, was performed 10 min after exercise cessation. Both teachers and school administrators should take advantage of the beneficial effects of acute physical exercise on tasks that require high cognitive demand.

References

1. Audiffren M. Acute exercise and psychological functions: a cognitive-energetic approach. In: T McMorris, P Tomporowski and M Audiffren editors. *Exercise and cognitive function*. Chichester: Wiley-Blackwell; 2009, pp. 3-39.
2. Bar-Or O. *Pediatric sports medicine for the practitioner: from physiologic principles to clinical application*. New York: Springer-Verlag; 1983, 376 p.
3. Caterino MC, and Polak ED. Effects of two types of activity on the performance of second-, third-, and fourth-grade students on a test of concentration. *Percept. Mot. Skills*. 1999;89(1):245-8.
4. Courchesne E. Neurophysiological correlates of cognitive development: Changes in long-latency event-related potentials from childhood to adulthood. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol*. 1978;45:468-82.
5. Courchesne E. A neurophysiological view of autism. In: E Schopler and GB Mesibov editors. *Neurobiological issues in autism*. New York: Plenum Press; 1987, pp. 285-324.
6. Courchesne E, Elmasian RO, and Yeung-Courchesne R. P3b and Nc: Basic clinical and developmental research. In: AM Halliday, SR Butler and R Paul editors. *A textbook of clinical neurophysiology*. Chichester: John Wiley & Sons; 1987, pp. 645-76.
7. Davies PL, Segalowitz SJ, and Gavin WJ. Development of response-monitoring ERPs in 7- to 25-year-olds. *Dev. Neuropsychol*. 2004;25(3):355 – 76.
8. Donchin E. Presidential Address, 1980 – Surprise! ... Surprise? . *Psychophysiology*. 1981;18(5):493-513.
9. Eckert HM, and Eichorn DH. Developmental variability in reaction time. *Child Dev*. 1977;48(2):452-8.

10. Elleberg D, and St-Louis-Deschenes M. The effect of acute physical exercise on cognitive function during development. *Psychology of Sport and Exercise*. 2010;11(2):122-6.
11. Fuchigami T, Okubo O, Ejiri K, Fujita Y, Kohira R, Noguchi Y, Fuchigami S, Hiyoshi K, Nishimura A, and Haradag K. Developmental changes in P300 wave elicited during two different experimental conditions. *Pediatr. Neurol.* 1995;13(1):25-8.
12. Gratton G, Coles MGH, and Donchin E. A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1983;55(4):468-84.
13. Grego F, Vallier JM, Collardeau M, Bermon S, Ferrari P, Candito M, Bayer P, Magnie MN, and Brisswalter J. Effects of long duration exercise on cognitive function, blood glucose, and counterregulatory hormones in male cyclists. *Neurosci. Lett.* 2004;364(2):76-80.
14. Hillman CH, Pontifex MB, Raine LB, Castelli DM, Hall EE, and Kramer AF. The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*. 2009;159(3):1044-54.
15. Hillman CH, Snook EM, and Jerome GJ. Acute cardiovascular exercise and executive control function. *Int. J. Psychophysiol.* 2003;48(3):307-14.
16. Holguin SR, Porjesz B, Chorlian DB, Polich J, and Begleiter H. Visual P3a in male subjects at high risk for alcoholism. *Biol. Psychiatry*. 1999;46(2):281-91.
17. Kahneman D. *Attention and effort*. Englewood-Cliffs: Prentice Hall; 1973, 264 p.
18. Kamijo K, Nishihira Y, Higashiura T, and Kuroiwa K. The interactive effect of exercise intensity and task difficulty on human cognitive processing. *Int. J. Psychophysiol.* 2007;65(2):114-21.
19. Karrer R, and Ackles PK. Visual event-related potentials of infants during a modified oddball procedure. In: R Johnson, JW Rohrbaugh and R

- Parasuraman editors. *8th International Conference on Event-Related Potentials of the Brain*. Stanford University, California: Elsevier Science Publishers (Biomedical Division); 1987, pp. 603-8.
20. Kihara M, Hogan AM, Newton CR, Garrashi HH, Neville BR, and de Haan M. Auditory and visual novelty processing in normally-developing Kenyan children. *Clin. Neurophysiol.* 2010;121(4):564-76.
 21. Kutas M, McCarthy G, and Donchin E. Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science.* 1977;197:792-5.
 22. Magliero A, Bashore TR, Coles MGH, and Donchin E. On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology.* 1984;21(2):171-86.
 23. McMorris T. Exercise and cognitive function: a neuroendocrinological explanation. In: T McMorris, PD Tomporowski and M Audiffren editors. *Exercise and cognitive function*. Chichester: Wiley-Blackwell; 2009, pp. 41-68.
 24. Nakamura Y, Nishimoto K, Akamatu M, Takahashi M, and Maruyama A. The effect of jogging on P300 event related potentials. *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.* 1999;36 71-4.
 25. Norman DA, and Bobrow DG. On data-limited and resource-limited processes. *Cognit. Psychol.* 1975;7(1):44-64.
 26. Pesce C, Crova C, Cereatti L, Casella R, and Bellucci M. Physical activity and mental performance in preadolescents: Effects of acute exercise on free-recall memory. *Mental Health and Physical Activity.* 2009;2:16-22.
 27. Polich J. Updating p300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clin. Neurophysiol.* 2007;118(10):2128-48.
 28. Polich J, and Comerchero MD. P3a from visual stimuli: Typicality, task, and topography. *Brain Topogr.* 2003;15(3):141-52.

29. Polich J, and Criado JR. Neuropsychology and neuropharmacology of P3a and P3b. *Int. J. Psychophysiol.* 2006;60(2):172-85.
30. Reynolds GD, and Richards JE. Familiarization, attention, and recognition memory in infancy: An event-related potential and cortical source localization study. *Dev. Psychol.* 2005;41(4):598-615.
31. Robertson RJ, Goss FL, Boer NF, Peoples JA, Foreman AJ, Dabayebbeh IM, Millich NB, Balasekaran G, Riechman SE, Gallagher JD, and Thompkins T. Children's OMNI Scale of Perceived Exertion: mixed gender and race validation. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2000;32(2):452-8.
32. Sawaki R, and Katayama J. Stimulus context determines whether non-target stimuli are processed as task-relevant or distractor information. *Clin. Neurophysiol.* 2006;117(11):2532-9.
33. Sibley BA, and Etnier JL. The relationship between physical activity and cognition in children: A meta-analysis. *Pediatr. Exerc. Sci.* 2003;15(3):243-56.
34. Stroth S, Kubesch S, Dieterle K, Ruchsow M, Heim R, and Kiefer M. Physical fitness, but not acute exercise modulates event-related potential indices for executive control in healthy adolescents. *Brain Res.* 2009;1269:114-24.
35. Thomas K, and Nelson C. Age-related changes in the electrophysiological response to visual stimulus novelty: a topographical approach. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1996;98(4):294-308.
36. Tomporowski PD, Davis CL, Lambourne K, Gregoski M, and Tkacz J. Task Switching in Overweight Children: Effects of Acute Exercise and Age. *J. Sport Exerc. Psychol.* 2008;30(5):497-511.

37. Tomporowski PD, Davis CL, Miller PH, and Naglieri JA. Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Educ. Psychol. Rev.* 2008;20(2):111-31.
38. Tucker DM. Spatial sampling of head electrical fields: the geodesic sensor net *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1993;87(3):154-63.
39. Yagi Y, Coburn KL, Estes KM, and Arruda JE. Effects of aerobic exercise and gender on visual and auditory P300, reaction time, and accuracy. *Eur. J. Appl. Physiol.* 1999;80(5):402-8.
40. Zervas Y, Danis A, and Klissouras V. Influence of physical exertion on mental performance with reference to training. *Percept. Mot. Skills.* 1991;72(3):1215-21.

Table 5.I Participants' demographic and fitness data.

Variables	8-9 year-olds	11-12 year-olds
N	16 (7 males)	16 (7 males)
Age (years)	9.0 (0.4)	11.8 (0.6)
BMI (kg/m ²)	15.9 (1.7)	18.5 (2.3)
MAP (W)	78.9 (14.1)	118.2 (22.9)
HR _{max} (bpm)	190.9 (10.3)	195.1 (6.8)
Mean exercise power (W)	38.6 (7.1)	57.9 (11.3)
Mean exercise HR (bpm)	148.1 (11.3)	149.4 (9.9)
Mean exercise OMNI-RPE	3.7 (2.3)	4.8 (1.9)

Note: BMI = body mass index; HR_{max} = maximum heart rate achieved during maximal aerobic power test; MAP = maximal aerobic power; mean exercise HR = mean heart rate during the cycling exercise at 50 % of MAP; mean exercise OMNI-RPE = average rating of perceived exertion during the cycling exercise at 50 % of MAP.

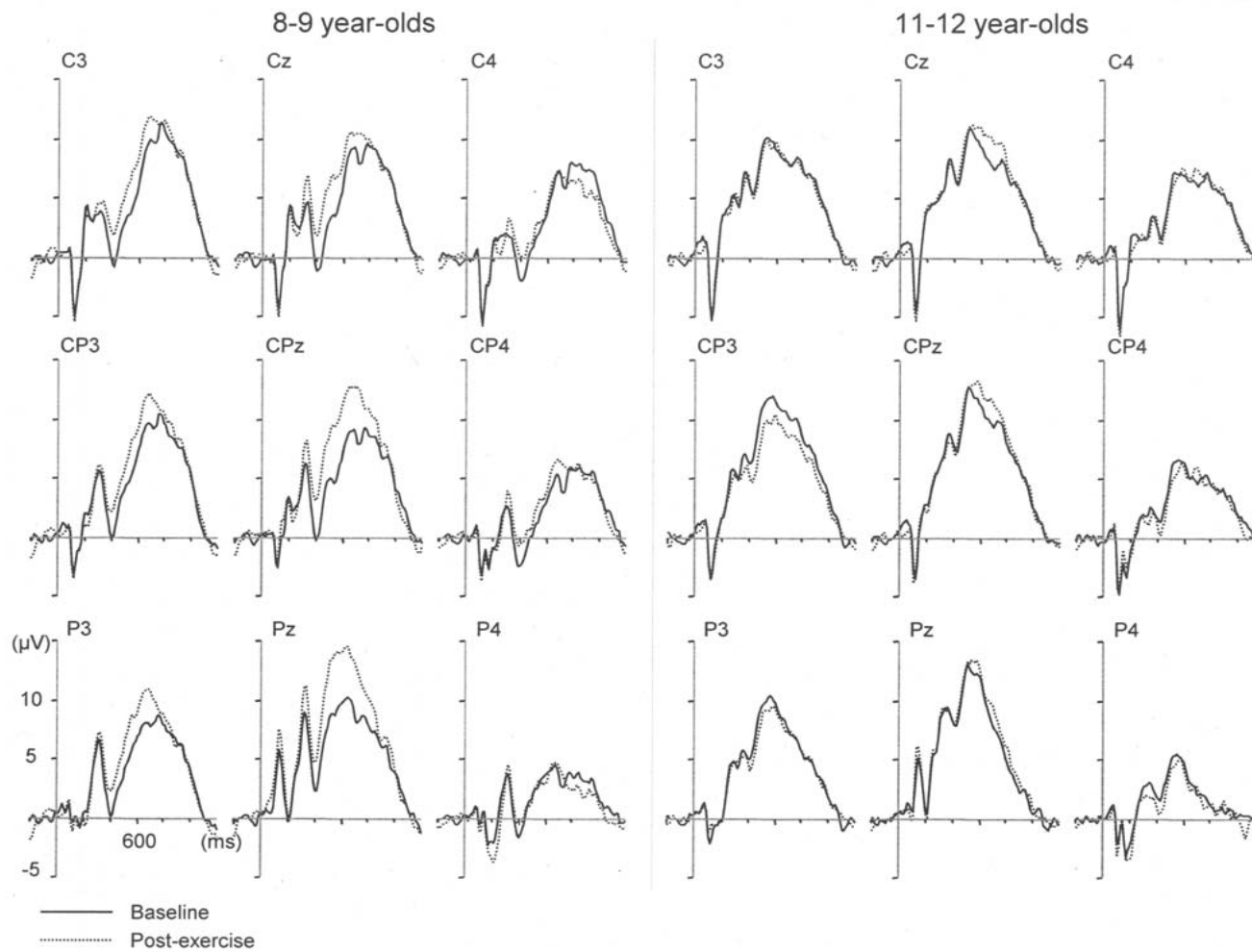


Figure 5.2. Grand average ERP waveforms for the target stimulus (P3b) for 8-9 and 11-12 year-olds at centro-parietal electrodes.

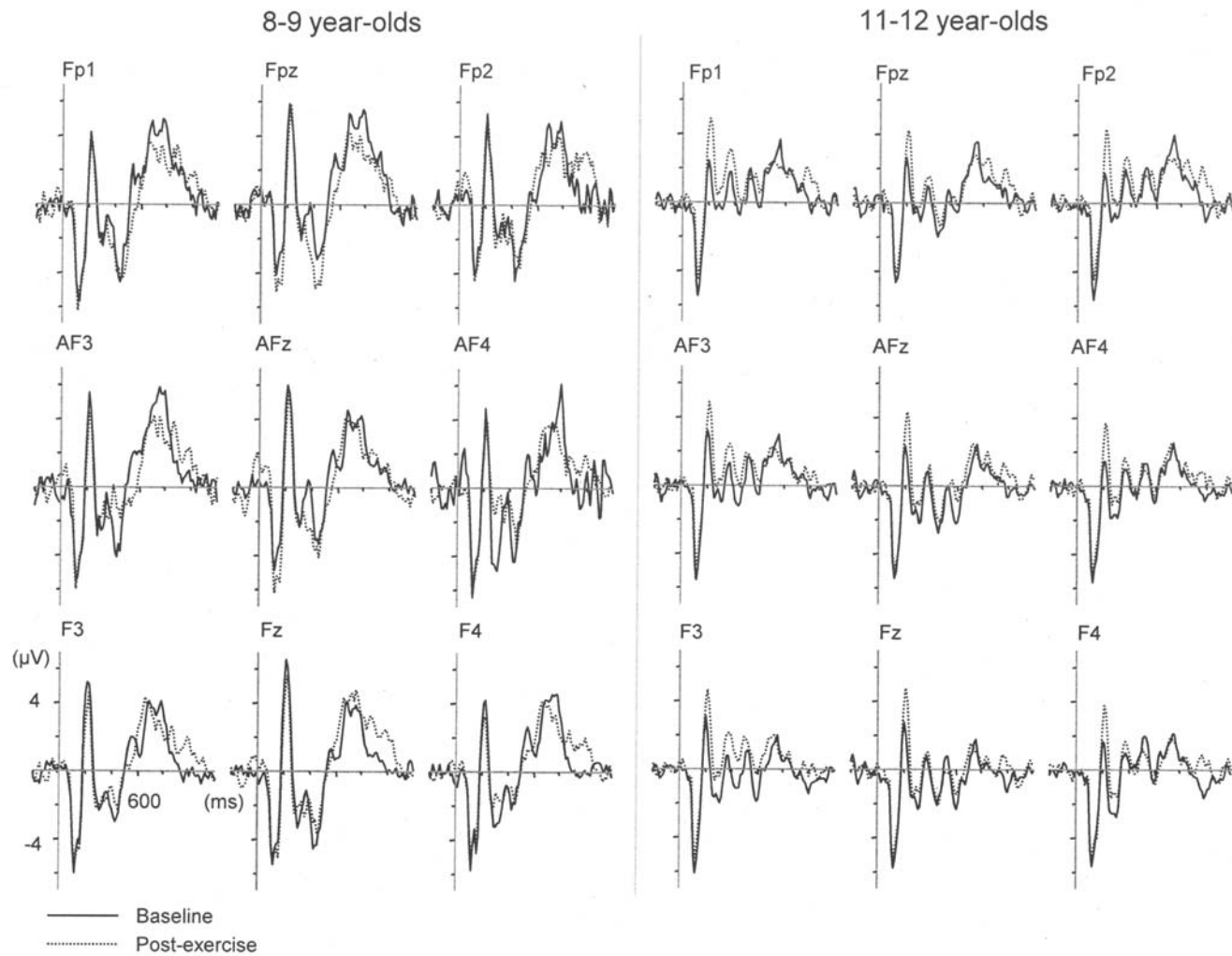


Figure 5.3. Grand average ERP waveforms for the non target stimulus (Nc) for 8-9 and 11-12 year-olds at frontal electrodes.

5.4 Article 3

The effect of a physical activity program on electrophysiological indices of cognition in children

**The effect of a physical activity program on electrophysiological indices of
cognition in children**

Mathilde St-Louis-Deschênes^{1,2} and Dave Elleberg^{1,2}

¹Université de Montréal, Département de kinésiologie

²Centre de Recherche en Neuropsychologie et Cognition

En préparation

Abstract

This study examined the effect of a physical activity program on aerobic fitness and cognitive functioning in a group of 8 to 10-year-old boys and girls. Thirty-seven children were assigned either to a 12-week physical activity program (n = 19) or to a control condition (n = 18). Physical fitness and cognitive functioning were evaluated pre- and post-intervention. Participants performed a 3-stimuli visual oddball task and a priming task while ERPs were measured. The components investigated in this study reflect processes related to updating working memory (P3b), attention capture (Nc), and long-term memory (N400). Analyses revealed that the physical activity program did not improve aerobic fitness or the electrophysiological indices of cognition. Moreover, no association was found between the training variables (exercise intensity, changes in aerobic fitness) and the changes in the indices of cognitive functioning. For behavioural variables, the experimental group improved only on one measure from the pre-test to the post-test. The results indicate that a 12-week physical activity program of moderate to vigorous intensity is insufficient to ameliorate the processes related to updating working memory, attention capture, and long-term memory in « high-fit » children. Methodological aspects are also discussed to guide future intervention studies in conjunction with exercise and cognition.

Keywords: intervention studies; physical fitness; event-related potentials (ERPs); Nc; P3b; N400

Introduction

The health benefits of physical activity are well known. Even in children, physical activity reduces risk factors associated with cardiovascular diseases and type II diabetes (Janssen & LeBlanc, 2010). However, children in many industrialised countries are becoming less fit, more sedentary, and inactivity has become a public health concern (Ogden, Flegal, Carroll, & Johnson, 2002; Shields, 2006). Beyond the health related problems associated with inactivity, there is now compelling evidence suggesting that the child's cognitive functioning may also suffer from sedentary behaviour (Cserjési, Molnár, Luminet, & Lénárd, 2007; Miller et al., 2006).

The development and the greater accessibility to neuroimaging techniques have certainly contributed to the understanding of the mechanisms that underlie the relationship between exercise and cognition. There is now a growing body of evidence suggesting that both behavioural (Buck, Hillman, & Castelli, 2008; Chaddock, Hillman, Buck, & Cohen, 2011; Wu et al., 2011) and electrophysiological indices of cognition (Hillman, Buck, Themanson, Pontifex, & Castelli, 2009; Pontifex et al., 2011) are related to aerobic fitness. To our knowledge, Hillman and co-workers (2005) were the first to investigate the relationship between fitness and cognitive functioning in children with ERP. Using a task of visual discrimination (oddball task) they found that high-fit children responded faster than their lower-fit counterparts. Moreover, the examination of electrophysiological indices of cognition (the P3 component) revealed greater allocation of neural resources to the process of working memory update and faster stimulus classification speed in high-fit children.

Differences between high-fit and lower-fit children were also demonstrated for long-term memory while children with higher cardiovascular function were able to encode and recognize more items during an associative memory task (Chaddock, et al., 2011). Moreover, volumetric analyses of the hippocampus with magnetic resonance imaging (MRI) revealed greater volume for this structure in high-fit children when compared with low-fit children (Chaddock et al., 2010). These results are coherent with the animal literature, which clearly indicates that voluntary wheel running benefits long-term memory in rodents (Ding, Vaynman, Akhavan, Ying, &

Gomez-Pinilla, 2006; van Praag, Christie, Sejnowski, & Gage, 1999; Vaynman, Ying, & Gomez-Pinilla, 2004) and activates the release of growth and neuroprotective factors implicated in neurogenesis, synaptic plasticity, and angiogenesis in the hippocampus (Christie et al., 2008; Ploughman, 2008; van Praag, 2008).

According to these cross-sectional studies, both long-term memory processes and indices of working memory update appear to be positively influenced by cardiovascular fitness. However, it remains to be determined whether a cardiovascular training program would lead to similar results. This is an important step in order to validate the results obtained by cross-sectional studies because this type of experimental design cannot control for all possible confounds such as differences in nutrition, motivation, genetic, and personality between the high and lower fit children. Moreover, the findings need to be interpreted with caution given that the cardiovascular function of the participants can be qualified as extreme, below the 30th and above the 70th percentile for maximal oxygen consumption (VO₂max).

To date, only a few number of studies investigated the effect of a physical activity program on cognitive processes in children (Castelli, Hillman, Hirsch, Hirsch, & Drollette, 2011; Davis et al., 2011; Kamijo et al., 2011; Tuckman & Hinkle, 1986). Although they did not specifically examined memory functions or the P3 component, some studies provided insight into the dose-response relationship between exercise and cognition. For example, Davis and collaborators (2011) compared two intervention programs and a control condition which were provided to 7- to 11-year-old overweight children. Both interventions were offered five times per week for 13 weeks. The training intensity was fixed (mean HR frequency of 166 bpm) but the interventions differed in terms of session duration: 20 versus 40 min. Their findings indicated a linear relationship between exercise volume and the cognitive improvements, suggesting that the higher is the training volume the greater are the cognitive outcomes. On the other hand, Castelli and al. (2011) examined the relationship between exercise intensity and cognitive performance following a 9-month program of physical activity. The results revealed that only the

time spent exercising at a vigorous intensity (above 80 % of HRmax) was associated with the cognitive improvements.

Altogether, cross-sectional and experimental studies provide a framework to investigate the chronic effects of physical activity on cognitive functions in children. On one hand, the cross-sectional literature suggests that cardiovascular function is associated with cognitive performance in children. Given the higher level of physical activity in children, the literature suggests that training a child's aerobic function requires exercise intensities greater than 80 % of HRmax (Baquet, Van Praagh, & Berthoin, 2003; Léger, Bosquet, & Folch, 1997). Interestingly this corresponds with the relationship observed between exercise intensity and cognitive improvements in children (Castelli, et al., 2011). In order to bridge the gap between these experimental and cross-sectional studies, we propose to investigate the effect of a physical activity program on electrophysiological indices of cognition such as those related to long-term memory and working memory update. We hypothesized that children who participate in a physical activity program will improve both their cardiovascular and cognitive functions. Moreover, we believe the changes in electrophysiological indices of cognition will be related to the changes in aerobic fitness.

Method

Design

This study had a quasi-experimental design. Participants were assigned to either an experimental or a control condition. The experimental group participated in a physical activity program, three times per week for 12 weeks. Structured physical activity took place in the gymnasium of the school after classes (two 1 h sessions per week) and during lunch time (one 45 min session per week). The control group pursued regular activities provided by the after school daycare or returned home. All participants completed a pre-and post-intervention evaluation of physical fitness and of cognitive performance.

Participants

This study included 37 children from 3rd and 4th grades. All participants were recruited from the same public school over two consecutive years. The first 19 participants were assigned to the experimental condition whereas the remaining 18 participants were assigned to the control condition. One participant in the control group did not complete the follow-up tests, and thus, was not included in the analyses. Each participant's parent read and signed an informed-consent approved by the *Comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé of the Université de Montréal*. Each child provided verbal assent. All participants had normal or corrected to normal vision, were free of neurological disorders, learning disabilities and history of head injury; this was verified by the means of a questionnaire completed by the parent. Possible confound variables such as physical activity level, socioeconomic status, self-esteem, and intellectual quotient were also documented because of their known relationship with physical activity and cognitive performance. Participants' data are provided in Table 5.II. Statistical analyses revealed no significant differences between groups on any of the variables (all $ps > .05$).

Insert Table 5.II about here

Tests and questionnaires

Physical activity level. Parents completed a physical activity questionnaire twice, once just before the beginning of the study (PApre) and a second time during the last month of the study (PAduring). The questionnaire documented their child's level of physical activity during a period of 7 consecutive days. Calculation of the level of physical activity (h per wk) was based on sport club participation, involvement in physical activities during recess, and leisure time spent practicing physical activities. The data presented in the Table 5.II also include the participation in the intervention program.

Socioeconomic status. The socioeconomic status was estimated according to the highest level of education achieved by the mother.

Self-esteem. Self-esteem was assessed with the French version of the Rosenberg's Self-Esteem scale (Vallieres & Vallerand, 1990). Each participant completed the questionnaire pre- and post-intervention.

Intellectual quotient. The Coloured Progressive Matrices of Raven were administered individually for each child at baseline. This test requires perceptual reasoning processes and evaluates mental development up to intellectual maturity (Raven, Raven, & Court, 1998).

Fitness evaluation. The fitness evaluation was completed twice within an interval of three months (pre- and post-intervention). Physical fitness was assessed with the FITNESSGRAM, a fitness evaluation program especially designed for youth (The Cooper Institute, 2007). Data are presented in Table 5.IV. Four aspects of physical fitness were evaluated: 1) aerobic capacity, 2) body composition, 3) muscular strength, and 4) flexibility. To do so, four tests were employed. Aerobic capacity was measured with the Progressive Aerobic Cardiovascular Endurance Run (PACER) test. Participants ran as long as possible back and forth according to a specified pace that progressively got faster. Estimated VO_2 max was predicted with the equation developed by Léger et al. (1988) which is based on maximal shuttle run speed and age. During the PACER test, each participant wore a HR monitor (Polar Team SystemTM, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) which provided a measure of HRmax. Body composition was assessed by BMI based on the participant's weight and height. Push-ups were performed to measure muscular strength and endurance. Participants had to complete as many push-ups as possible according to a cadence imposed by the evaluator. Hamstrings' flexibility was measured with the sit and reach test. Test administration was slightly modified from the original version. Indeed both legs had to be fully extended instead of one at a time to reach the maximal distance.

Physical activity program

The physical activity program included various activities of moderate and vigorous intensities such as tag games, opposition games, ball games and team sports. The physical activities were modified to reduce waiting time and inactivity. The attendance to the physical activity sessions was 90 %. During at least one session per week each participant wore a HR monitor (Polar Team System™, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) which recorded HR frequency according to a sampling rate of 5 s. This allowed the quantification of the time spent exercising at a given intensity and the involvement in the program for each participant. Exercise intensity was categorized into four levels according to the guidelines of the American College of Sports Medicine (2010): very light (< 50 % of HRmax), light (50-63 % of HRmax), moderate (64-76% of HRmax) and vigorous (> 77 % of HRmax). HR data were also collected on a sub-set of participants in the control group (n = 12) which pursued the regular activities provided by the after school daycare.

Cognitive tasks

Regarding the participants in the experimental group, the post-intervention assessment of cognitive functions was performed 3.1 days ($SD = 2.8$ days) after the end of the physical activity program. This was done to avoid any potential detrimental effect of detraining on cognitive functions.

Oddball task. A 3-stimuli visual oddball task was performed pre- and post-intervention. The task consisted of presenting white rectangles (2.5 cm wide and 8.5 cm long) for a duration of 70 ms on a black background (Holguin, Porjesz, Chorlian, Polich, & Begleiter, 1999) according to an interstimuli interval ranging from 1600 to 2000 ms. The standard stimulus was vertical (.76 probability), the target was tilted 3° from vertical (.12 probability), and the salient non target was horizontal (.12 probability). The distance between the participant's eyes and the centre of the computer screen was 1 m. All participants received the instruction to respond as fast as possible with the index finger of their dominant hand when the target stimulus appeared. However, they were asked to place emphasis on accuracy rather than speed. A 15 trial practice session was provided to ensure that each participant understood and could complete the task. The task consisted of three blocks of 169 stimuli each.

Rest periods of 2 min were provided between each block. The task lasted on average 22 min, including rest periods.

The recording of an EEG during the task permitted the investigation of two ERP: P3b and Nc. The P3b component is elicited by the target stimulus. Its amplitude reflects relatively complex neurocognitive processes associated with the allocation of neuronal resources involved in updating information in working memory (Donchin, 1981; Polich, 2007) whilst its latency indexes stimulus classification speed (Kutas, McCarthy, & Donchin, 1977; Magliero, Bashore, Coles, & Donchin, 1984). The neural generators of this component most likely appear to be located at the temporo-parietal junction and in the parietal lobe (Bledowski et al., 2004; Kiehl, Laurens, Duty, Forster, & Liddle, 2001; Knight, Scabini, Woods, & Clayworth, 1989; Verleger, Heide, Butt, & Kömpf, 1994). The Nc component which is elicited by the non target stimulus reflects relatively automatic and less complex process of attention capture (Courchesne, 1978, 1987). It is hypothesised that the main neural sources of this component are located in the frontal lobes (Reynolds & Richards, 2005).

Priming task. The task was inspired by the work of Byrne et al. (1999). It consisted of the auditory presentation of a word that correctly (congruent (CONG) trial) or incorrectly (incongruent (INCO) trial) corresponded to a picture. The task was performed pre- and post-intervention with different versions.

The visual stimuli were pictures of black and white drawings that were approximately 9.0 X 6.7 cm. They were taken from the *Échelle de Vocabulaire en Images Peabody* (EVIP) (Dunn, Thériault-Whalen, & Dunn, 1993) form A (task version 1) and B (task version 2) and they were chosen to be age appropriate (level 8 year-olds and under). Pictures were scanned using the ScanJet 5590 HPTM and adjusted with Adobe Photoshop 6.0TM.

Auditory stimuli were French words spoken by a male human voice recorded in stereo at 12 kHz with Cool Edit Pro 2.0TM software. Word onset and offset were determined visually based on the word's digitized waveform. For the task version 1, mean duration of the auditory stimuli was 643 ms with a minimal length of 184 ms

and a maximal length of 1089 ms. For the task version 2, mean duration was 670 ms with a minimal and a maximal length of 281 and 1040 ms, respectively. The words correctly naming the pictures were chosen in the EVIP (level 8 year-olds and under) (Dunn, et al., 1993) whilst the words incorrectly naming the pictures were selected from different lists of words (Boulenger, Décoppet, Roy, Paulignan, & Nazir, 2007; Chalard, Bonin, Méot, Boyer, & Fayol, 2003). CONG and INCO words were paired based on age of acquisition and number of syllables.

Each version of the priming task consisted in 134 trials, including four practice trials. Half of the trials were CONG whilst the other half were INCO. Each trial started with a picture, which appeared for 700 ms before word onset, and which remained visible for approximately 1650 ms after word onset. The distance between the participant's eyes and the centre of the computer screen was 1 m. Auditory stimuli were presented binaurally via SHURETM sound isolating earphones at a SPL level of 55-65 dB (reference 20 μ Pa). The auditory stimuli were calibrated using a Brüel and Kjaer sound level meter (type 2239) and a prepolarized condenser microphone (type 4188). Participants were required to press simultaneously with their right and left thumbs the outer keys of a four buttons response pad if the word heard was CONG with the picture and the inner keys if it was INCO. During the inter-trial interval a central fixation cross remained on the screen for 2000 ms. The order of trial presentation was randomized. Participants performed the task twice to study the effect of repetition. Task repetition was interspersed by a rest period of 10 min.

The EEG recording during the priming task allowed the investigation of the N400 component. This component is elicited by the INCO trials. Its amplitude is modulated by immediate context (CONG or INCO trials) and it reflects the access to semantic memory (Federmeier & Laszlo, 2009; Kutas & Federmeier, 2011). The main neural sources of this component are hypothesis to be located in the temporal lobes (McCarthy, Nobre, Bentin, & Spencer, 1995; Nobre & McCarthy, 1995). Moreover, the reduction in the amplitude of the N400 associated with task repetition reflects the access to long-memory (Kutas & Federmeier, 2000). In this article the

N400diff will be designated as the differential wave calculated from this repetition effect (INCO1 minus INCO2).

EEG recordings

EEG were recorded using a 128-electrode Geodesic Sensor NetTM (EGI, Eugene, OR, USA) (Tucker, 1993). Electrode impedance was kept below 50 k Ω , which is the recommended level for high input impedance amplifiers (Tucker, 1993). Each electrode was referenced to Cz and an electrode placed anterior to Pz served as the ground. The EEG signal was amplified with Net Amps 200 amplifier (EGI, Eugene, OR, USA) and a band-pass filter was set at 0.1-100 Hz. The signal was digitalized at 250 Hz and the data were recorded with Net Station software (EGI, Eugene, OR, USA). Before the installation of the Geodesic Sensor NetTM, the electrodes were soaked in a saline solution and Nuprep gel (Weaver & Co., Aurora, CO, USA) was applied on the scalp of the subjects with an alcohol pad (PDI, Orangeburg, NY, USA) to reduce skin impedance. All recordings were made whilst the subject sat comfortably on a chair in a dimly light electromagnetic isolated and sound attenuated room.

ERP analyses

EEG recordings were analyzed using Brain Vision Analyzer software, version 1.05 (Brain Products, Munich, Germany). The data were filtered off-line with a digital band pass filter of 0.1-30 Hz and 24 dB/octave. Blinks and ocular movements were corrected with ICA. The data were re-referenced to average mastoids (A1-A2). Depending on the cognitive task, EEG recordings were segmented in epochs according to different criteria. For the P3b and the Nc components the epochs were segmented beginning 200 ms before and ending 1200 ms after the stimulus onset. For the N400 components, the epochs began 100 ms before and ended 1000 ms after the auditory stimulus onset. A local DC trend and a baseline correction were applied to the time segment before the onset of stimulus. Segments with activity exceeding $\pm 100 \mu\text{V}$ or incorrectly answered by the participant were excluded from the analyses with artifact rejection. Data were averaged across trials for each stimulus category.

The P3b component was measured over a time window of 450-700 ms. The mean amplitude of the P3b was determined over midline and laterality of the centro-parietal region (i.e., C3, Cz, C4, CP3, CPz, CP4, P3, Pz, P4), whilst its latency was determined at Pz, which is the scalp location corresponding to the maximal positive deflection. The Nc component was assessed over a time window of 350-550 ms. The mean amplitude of the Nc was measured over midline and laterality of the frontal region (i.e., Fp1, Fpz, Fp2, AF3, AFz, AF4, F3, Fz, F4) and its latency was determined at AFz, which is the scalp location corresponding to the maximal negative deflection.

The N400 component was measured over a time window of 350-800 ms for both CONG and INCO trials. The mean amplitude of the N400 was determined over midline and laterality of the centro-parietal region (i.e., C5, C3, C1, Cz, C2, C4, C6, CP5, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, CP6, P5, P3, P1, Pz, P2, P4, P6), whilst its latency was determined at Pz, which is the scalp location corresponding to the maximal negative deflection. The difference-waveform for the INCO trials (N400diff) was calculated based on the first (INCO1) and second (INCO2) presentations of the INCO picture-word pairs. Analyses for the mean amplitude of the N400diff were conducted over the same time window and electrodes than the N400 component.

Statistical analyses

Exercise intensity. A mixed model of ANOVA 2 (Group: control and experimental) X 4 (Intensity Category: very light, light, moderate, and vigorous) was conducted on the percentage of time spent at different exercise intensities. This was done to compare the after school daycare activities with our physical activity program.

Fitness. In order to determine the impact of the physical activity program on fitness, separate analyses were conducted for each fitness variable. A mixed model of ANOVA 2 (Group) X 2 (Time: pre- and post-intervention) was used.

Oddball task. For behavioural variables, separate analyses were conducted on response accuracy for each stimulus category (standard, target, and non target) and on

target stimulus reaction time. A mixed model of ANOVA 2 (Group) X 2 (Time) was used. This was done to determine if there were any differences in response accuracy or reaction time according to experimental condition and time of the test for a given stimulus category.

For ERPs, separate analyses were conducted on the mean amplitude and the latency of each component. Nc and P3b latencies were submitted to a 2 (Group) X 2 (Time) mixed model of ANOVA whilst the factors Region (3 levels) and Laterality (3 levels) were added to the analyses of the mean amplitude values.

Priming task. For the priming task, statistical analyses were performed on 31 subjects. Data from two participants in the experimental group were excluded from the analyses because of an error during the EEG recording. Furthermore, three other participants were discarded because their response accuracy was less than 50 % for at least one stimulus category.

The behavioural analyses were performed only on response accuracy because participants did not receive instructions regarding response time for this task. A mixed model of ANOVA 2 (Group) X 2 (Time) X 2 (Repetition: e.g. INCO1 and INCO2) was applied to the response accuracy data for each stimulus category separately (CONG and INCO trials). This was done to determine if there were any differences in response accuracy according to experimental condition and time of the test for a given stimulus category.

For ERPs, separate analyses were conducted on the mean amplitude and the latency of each component. The N400 latencies were submitted to a 2 (Group) X 2 (Time) X 2 (Stimulus Category: CONG and INCO) ANOVA. Mean amplitude values for the N400 were submitted to a mixed model of ANOVA 2 (Group) X 2 (Time) X 2 (Stimulus Category) X 3 (Region) X 7 (Laterality) whilst for the mean amplitude of the N400diff the factor Stimulus Category was removed.

Additional analyses were conducted only on the experimental group in order to determine if the changes in aerobic fitness or time spent exercising at a vigorous intensity were related to the changes in ERP components. To do so, Pearson Product-

Moment correlations were calculated for time spent exercising at a vigorous intensity and changes (post-test minus pre-test) in VO₂max, P3b latency and amplitude, Nc latency and amplitude, N400 latency and amplitude, and N400diff amplitude.

For all statistical analyses confidence intervals were adjusted for multiple comparisons with Bonferroni's correction. An alpha level of .05 was used for all statistical tests. Statistical analyses were performed with SPSS 16.0.

Results

Exercise intensity

Statistical analysis revealed a main effect of Intensity Category $F(1.77, 51.28) = 12.72, p < .001, \eta^2 = .31$ and a significant two-way interaction of Group X Intensity Category $F(1.77, 51.28) = 8.87, p = .001, \eta^2 = .23$. For post-hoc analyses, independent t-tests were conducted to compare the time spent exercising in each intensity category by the control and the experimental groups. The results are presented in Table 5.III. They revealed that the experimental group spent more time exercising at moderate and vigorous intensities than the control group and less time at very light and light intensities.

Insert Table 5.III about here

Fitness

Fitness data are presented in Table 5.IV. Statistical analysis for BMI revealed a significant Group X Time interaction. Post-hoc analyses were performed separately for each experimental condition. They indicated that BMI was higher at post-test than at pre-test for the experimental group $t(18) = 2.68, p = .015, d = .14$, while no such difference was observed for the control group ($p = .48$). The analysis on VO₂max

showed a significant main effect of Time $F(1, 34) = 15.44, p < .001, \eta^2 = .31$ and a significant two-way interaction of Group X Time $F(1, 34) = 15.53, p < .001, \eta^2 = .31$. Post-hoc analyses revealed that $VO_2\text{max}$ was greater at post-test than at pre-test for the control group $t(16) = 4.82, p < .001, d = .90$, while no such difference was found for the experimental group ($p > .99$). No significant effect was found for HRmax achieved during the PACER test or for the maximal number of push-ups correctly completed (all $ps \geq .32$). The analysis on flexibility revealed a significant two-way interaction of Group X Time $F(1, 34) = 10.43, p = .003, \eta^2 = .24$. Post-hoc analyses indicated that flexibility was worst at post-test than at pre-test for the control group $t(16) = 2.94, p = .010, d = .71$, while no significant effect was found for the experimental group ($p = .24$).

Insert Table 5.IV about here

Oddball task

Behavioural performance. The data for response accuracy and reaction time are presented in Figure 5.4 and Figure 5.5, respectively. For the standard stimulus, analysis on response accuracy revealed a main effect of Time $F(1, 34) = 4.73, p = .037, \eta^2 = .12$, with greater response accuracy on pre-test ($M = 97.7, SD = 1.9$) when compared with post-test ($M = 96.5, SD = 4.2$). No significant effect was found for the target or non-target stimulus (all $ps > .06$). However, participants tended to obtain better response accuracy for the target at post-test ($M = 83.8, SD = 11.4$) when compared with pre-test ($M = 86.9, SD = 11.2$), $F(1, 34) = 3.68, p = .063, \eta^2 = .10$. The analysis on target stimulus reaction time did not reveal any significant main effect or interaction (all $ps > .08$).

Insert Figure 5.4 and 5.5 about here

P3b mean amplitude. Grand averaged waveforms for the P3b component are presented in Figure 5.6. There was a significant main effect of Region $F(1.24, 42.18) = 5.02, p = .024, \eta^2 = .13$ and Laterality $F(1.82, 61.77) = 58.09, p < .001, \eta^2 = .63$. Moreover, there were two significant two-way interactions: Laterality X Group $F(1.82, 61.77) = 3.28, p = .049, \eta^2 = .09$ and Region X Laterality $F(2.16, 73.39) = 7.96, p = .001, \eta^2 = .19$. These last-interactions were superseded by a four-way interaction of Time X Region X Laterality X Group $F(3.11, 105.81) = 3.72, p = .013, \eta^2 = .10$. Post-hoc analyses were performed on the four-way interaction, separately for each experimental condition. They indicated a significant three-way interaction for the control group of Time X Region X Laterality $F(2.53, 40.52) = 3.87, p = .021, \eta^2 = .20$. However, the pairwise comparisons based on the factor Time did not reveal a significant effect for this factor (all $ps > .05$). All together, these results suggest that the mean amplitude of the P3b remained unchanged from pre-test to post-test in both groups.

P3b latency. The statistical analysis on the P3b latency revealed a main effect of time $F(1,34) = 5.84, p = .021, \eta^2 = .15$ evidencing shorter latency during the post-test ($M = 583.22, SD = 63.46$) compared with the pre-test ($M = 610.78, SD = 70.27$). No other significant effect was found. This result indicates that in both groups, the P3b latency was affected similarly and thus, that there was no significant effect of the physical activity program for that variable.

Insert Figure 5.6 about here

Nc mean amplitude. Grand averaged waveforms for the Nc component are presented in Figure 5.7. The statistical analysis indicated a significant main effect of Region $F(1.32, 44.87) = 22.75, p < .001, \eta^2 = .40$ and a significant main effect of Laterality $F(1.91, 64.98) = 10.64, p < .001, \eta^2 = .24$. No other significant effect was found (all $ps > .05$). Although there were differences in the topographical distribution for the mean amplitude of the Nc, no effect related to the physical activity program was found nor differences between groups.

Nc Latency. There was no significant interaction, no main effect of Time or main effect of Group (all $ps > .05$). This indicates that the Nc latency was unchanged from pre-test to post-test in both groups.

Insert Figure 5.7 about here

Priming task

Behavioural performance. The data for response accuracy are presented in Figure 5.8. For the CONG stimulus category the statistical analysis revealed a main effect of Repetition $F(1, 29) = 11.98, p = .002, \eta^2 = .29$ and a significant two-way interaction of Time X Repetition $F(1, 29) = 11.27, p = .002, \eta^2 = .28$ which were superseded by a triple interaction of Group X Time X Repetition $F(1, 29) = 4.72, p = .04, \eta^2 = .14$. Post-hoc analyses were performed for the triple interaction separately for each experimental condition. For the experimental group, there was a significant main effect of Repetition $F(1, 4) = 13.24, p = .003, \eta^2 = .47$ and a significant two-way interaction of Time X Repetition $F(1, 14) = 10.51, p = .006, \eta^2 = .43$. Pairwise comparisons based on the factor Time revealed that the participants in the experimental group performed with more accuracy at post-test ($M = 86.32, SD = 5.61$) than at pre-test ($M = 78.21, SD = 11.17$) on their first exposition to the picture-word pairs (INCO1), $t(14) = 3.70, p = .002, d = .92$. No significant effect was found for the INCO stimulus category (all $ps \geq .15$). Overall these results suggest an

improvement in the detection of CONG picture-word pairs following the physical activity program. No such effect was found for the INCO trials or in the control group.

Insert Figure 5.8 about here

N400 mean amplitude. Grand averaged waveforms for the N400 component are presented in Figure 5.9. The statistical analysis indicated a main effect of Stimulus Category $F(1, 29) = 143.28, p < .001, \eta^2 = .83$, Region $F(1.10, 31.91) = 29.06, p < .001, \eta^2 = .50$, and Laterality $F(2.09, 60.47) = 5.11, p = .008, \eta^2 = .15$. Furthermore, there were three significant two-way interactions: Stimulus Category X Region $F(1.20, 34.82) = 4.92, p = .027, \eta^2 = .15$, Stimulus Category X Laterality $F(1.98, 57.32) = 4.48, p = .016, \eta^2 = .13$, and Region X Laterality $F(3.46, 100.38) = 14.23, p < .001, \eta^2 = .33$. No significant effect including the factor Group or Time was found indicating similar mean amplitude for the N400 component between groups and no effect related to the physical activity program.

N400 latency. The statistical analysis on the N400 latency revealed a main effect of Stimulus Category $F(1, 29) = 10.10, p = .004, \eta^2 = .26$. No other significant result was found. This suggests that the N400 latency remained unchanged between pre-test and post-test for both groups.

Insert Figure 5.9 about here

N400diff. Grand averaged waveforms for the N400diff component are presented in Figure 5.10. The statistical analysis indicated a significant main effect of Laterality $F(2.15, 62.37), p = .044, \eta^2 = .10$ and a significant two-way interaction of Time X Region $F(1.33, 38.65) = 4.45, p = .031, \eta^2 = .13$. Post-hoc analyses were

conducted on the Time X Region interaction. However, pairwise comparisons on the factor Time did not reveal any significant result (all $ps \geq .30$). This result indicates that the physical activity program did not modulate the mean amplitude of the N400diff component.

Insert Figure 5.10 about here

Pearson Product-Moment correlations are presented in Table 5.V. No significant correlation was found between the training variables (time spent exercising at a vigorous intensity or changes [post minus pre] in $VO_2\text{max}$) and the changes in ERP amplitude or latency for the P3b, the Nc, the N400, and the N400diff components (all $ps > .05$). This suggests that neither the time spent exercising at a vigorous intensity nor the improvements in cardiovascular function were associated with the changes observed in electrophysiological indices of cognition.

Insert Table 5.V about here

Discussion

The aim of this study was to examine the effect of a 12-week physical activity program on children's fitness and cognitive functioning. Contrary to our initial hypotheses, the children who participated in the physical activity program did not improve their cardiovascular fitness while those in the control group did. The electrophysiological indices of cognition investigated (P3b, Nc, N400, N400diff) remained unchanged between pre- and post-intervention measures. However, the response accuracy for the priming task was improved at post-test among the participants in the experimental group. For the participants in the experimental group,

neither changes in aerobic fitness nor the time spent exercising at a vigorous intensity were associated with the modification of the ERP's amplitude or latency.

The physical activity program in the present study was designed to provide various activities of vigorous intensity with the aim to improve aerobic fitness. As reviewed by Baquet et al. (2003) a training program which aims to improve $VO_2\text{max}$ in children should include 3 to 4 sessions per week. Each session should last about 30 to 60 min and exercise intensity should be greater than 80 % of HRmax. A similar exercise prescription arose from a more recent review of the literature (Armstrong & Barker, 2011) although they recommend slightly longer exercise duration (i.e. 40 to 60 min) and higher exercise intensity (85 to 90 % of HRmax). A 4-week program can be sufficient to measure improvement in $VO_2\text{max}$ (Docherty, Wenger, & Collis, 1987). Our physical activity program was built in accordance with these parameters. The HR data collected during physical activities indicated that the experimental group spent twice as much time exercising at a vigorous intensity (28 % of session time, approximately 15 min per session) than the control group (15 % of session time, approximately 8 min) which pursued the typical activities provided by the regular after school daycare program. However, the results did not reveal significant improvements in $VO_2\text{max}$ for the experimental group, while the control group did improve its $VO_2\text{max}$.

Several explanations can be postulated to explain the lack of improvement in aerobic fitness in the experimental group. First, it can be argued that the participants involved in the physical activity program already had elevated $VO_2\text{max}$ values at the pre-test and thus their possible gain was limited. Second, $VO_2\text{max}$ values were not directly measured; they were estimated from the performance at the PACER test which is a less precise index of cardiovascular fitness. Third, although our physical activity program agreed with the training parameters proposed by Baquet et al. (2003) we did not individualise exercise intensity. Moreover, the games and the activities included in our program mostly produced short bursts of exercise while more sustained exercises could have been preferable. Fourth, it can be argued that the experimental group compensated for its elevated level of physical activity in school

by reducing spontaneous physical activity outside the school. This could negate the potential cardiovascular benefits related to the intervention. However, the data collected through the physical activity questionnaire do not support this hypothesis. In fact, before the onset of the study similar levels of physical activity were reported for both groups (approximately 5 h per week) whilst a 2.5 h per week advantage was found for the experimental group during the intervention (9.4 h per week) compared with the control group (7.0 h per week).

The improvement in $VO_2\text{max}$ for the control group was somewhat surprising. It is unlikely that the participants in this group underperformed the test at baseline. Indeed HRmax values achieved during the PACER test at baseline are very similar between groups. The amelioration in cardiovascular function is possibly the result of a progression toward the mean given the slightly inferior values obtained at pre-test for this group. Although very speculative, it is possible that the participants in the control group improved their $VO_2\text{max}$ because they were more likely to perform activities of vigorous intensity in their leisure time. Unfortunately the information collected by the physical activity questionnaire is insufficient to verify this possibility.

The results did not confirm our hypothesis that the physical activity program improves electrophysiological indices of cognition. None of the components that we investigated were different at the post-test compared with the pre-test. Clearly, the lack of improvement in cardiovascular fitness for the experimental group is a shortcoming to the possible comparison with the cross-sectional studies evidencing higher P3b amplitude (Hillman, et al., 2009; Hillman, et al., 2005; Pontifex, et al., 2011) and better memory functions (Chaddock, et al., 2010; Chaddock, et al., 2011) in high-fit children. In order to overcome this shortcoming, Pearson Product-Moment correlations were calculated to verify possible relationships between the measures of physical activity and those related to cognitive functioning. No significant association was found between the training variables (time spent exercising at a vigorous intensity or the changes in $VO_2\text{max}$) and the changes in ERP's amplitude or latency. Nonetheless, it should be highlighted that the participants who were included in our

study were already demonstrating elevated cardiovascular functioning at the pre-test. Interestingly, the number of laps completed by the experimental group ($n = 31$) during the PACER test was identical to the performance of the high-fit group of Hillman et al. (2005). Thus, it can be argued that the children included in our study were already taking advantage of the beneficial effects of aerobic fitness on cognitive processes.

The experimental group improved only on one behavioural measure from the pre-test to the post-test. Indeed, the priming task evidenced an improvement in response accuracy for CONG trials. However, this amelioration seems mostly attributable to the poor performance of this group during the pre-test. Indeed, response accuracy increased from 78 % at pre-test to 86 % at the post-test for the experimental group while it remained stable at 84 % for control group. This behavioural outcome was not supported by a change in the amplitude or in the latency of the N400 component evoked by CONG trials.

The effects of our physical activity program on cognitive functioning can be compared with other intervention studies. Castelli et al. (2011) revealed that following a 9-month program of physical activity, only the time spent exercising at a vigorous intensity was associated with the improvement for tasks requiring high executive demands. This highlights two important parameters that should be considered in the interpretation of our results: the time spent exercising at a vigorous intensity and the cognitive demand of the tasks. Concerning exercise intensity, we were unable to show a relationship between the time spent exercising at a vigorous intensity and the changes observed in the ERP components. Possible explanations for this null finding are a small sample size ($n = 19$) and the relatively short duration of our physical activity program. Concerning the cognitive demand of our tasks, none of them evaluated executive functions. These high-level functions may be the most sensitive to the effect of physical training programs (Best, 2010; Tomporowski, Davis, Miller, & Naglieri, 2008). For example, Davis and co-workers (2011) measured cognitive functioning with the *Cognitive Assessment System* before and after a physical activity program of 13 weeks. Only the performance for the Planning

scale, which measures executive functions, revealed a significant improvement while the performance for the Simultaneous, Attention, and Successive scales remained unchanged. This result in addition to the functional MRI measures during a task of inhibition led the authors to conclude that the effect of physical activity is specific to executive functions. Other physical activity programs also demonstrated improvements in executive functioning in children (Castelli, et al., 2011; Kamijo, et al., 2011; Tuckman & Hinkle, 1986). The fact that we did not measure executive functions in our study may also explain the null findings.

Clearly, this study is submitted to several limitations. As previously discussed, the lack of improvement in aerobic fitness for the trained participants and its increase in control subjects constitute an important drawback in the interpretation of our results. This outcome could result from the short duration of our physical activity program, the lack of individualisation of the training intensity or to the high level of fitness at the pre-test. As well, the correlation analyses should be interpreted with caution given the small number of participants. Based on recent literature, the absence of tests measuring executive functions also appears as a major shortcoming in this study. All these elements should be considered in order to improve the methodology of future investigations of the relationship between physical activity and cognition.

Reference

- American College of Sports Medicine. (2010). Benefits and risks associated with physical activity. In W. R. Thompson, N. F. Gordon & L. S. Pescatello (Eds.), *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription* (8th ed., pp. 2-17). Philadelphia: Wolters Kluwer | Lippincott Williams & Wilkins.
- Armstrong, N., & Barker, A. R. (2011). Endurance training and elite young athletes. *Medicine and Sport Science*, 56, 59-83.
- Baquet, G., Van Praagh, E., & Berthoin, S. (2003). Endurance training and aerobic fitness in young people. *Sports Medicine*, 33(15), 1127-1143.
- Best, J. R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*, 30(4), 331-351.
- Bledowski, C., Prvulovic, D., Hoechstetter, K., Scherg, M., Wibral, M., Goebel, R., et al. (2004). Localizing P300 generators in visual target and distractor processing: A combined event-related potential and functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 24(42), 9353-9360.
- Boulenger, V., Décoppet, N., Roy, A. C., Paulignan, Y., & Nazir, T. A. (2007). Differential effects of age-of-acquisition for concrete nouns and action verbs: Evidence for partly distinct representations? *Cognition*, 103(1), 131-146.
- Buck, S. M., Hillman, C. H., & Castelli, D. M. (2008). The relation of aerobic fitness to stroop task performance in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(1), 166-172.
- Byrne, J. M., Connolly, J. F., MacLean, S., Dooley, J. M., Gordon, K. E., & Beattie, T. L. (1999). Brain activity and language assessment using event-related potentials: development of a clinical protocol. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 41(11), 740-747.

- Castelli, D. M., Hillman, C. H., Hirsch, J., Hirsch, A., & Drollette, E. (2011). FIT Kids: Time in target heart zone and cognitive performance. *Preventive Medicine*, 52(Supplement 1), S55-S59.
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Kim, J. S., Voss, M. W., VanPatter, M., et al. (2010). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain Research*, 1358, 172-183.
- Chaddock, L., Hillman, C. H., Buck, S. M., & Cohen, N. J. (2011). Aerobic fitness and executive control of relational memory in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(2), 344-349.
- Chalard, M., Bonin, P., Méot, A., Boyer, B., & Fayol, M. (2003). Objective age-of-acquisition AoA norms for a set of 230 object names in French: Relationships with psycholinguistic variables, the English data from Morrison et al. 1997, and naming latencies. *The European Journal of Cognitive Psychology*, 15, 209-245.
- Christie, B., Eadie, B., Kannangara, T., Robillard, J., Shin, J., & Titterness, A. (2008). Exercising Our Brains: How Physical Activity Impacts Synaptic Plasticity in the Dentate Gyrus. *NeuroMolecular Medicine*, 10(2), 47-58.
- Courchesne, E. (1978). Neurophysiological correlates of cognitive development: Changes in long-latency event-related potentials from childhood to adulthood. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 45, 468-482.
- Courchesne, E. (1987). A neurophysiological view of autism. In E. Schopler & G. B. Mesibov (Eds.), *Neurobiological issues in autism* (pp. 285-324). New York: Plenum Press.
- Cserjési, R., Molnár, D., Luminet, O., & Lénárd, L. (2007). Is there any relationship between obesity and mental flexibility in children? *Appetite*, 49(3), 675-678.

- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., McDowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E., et al. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: A randomized, controlled trial. *Health Psychology, 30*(1), 91-98.
- Ding, Q., Vaynman, S., Akhavan, M., Ying, Z., & Gomez-Pinilla, F. (2006). Insulin-like growth factor I interfaces with brain-derived neurotrophic factor-mediated synaptic plasticity to modulate aspects of exercise-induced cognitive function. *Neuroscience, 140*(3), 823-833.
- Docherty, D., Wenger, H. A., & Collis, M. L. (1987). The effects of resistance training on aerobic and anaerobic power of young boys *Medicine and Science in Sports and Exercise, 19*(4), 389-392.
- Donchin, E. (1981). Presidential Address, 1980 - Surprise! ... Surprise? . *Psychophysiology, 18*(5), 493-513.
- Dunn, L., Thériault-Whalen, C., & Dunn, L. (1993). *Echelle de vocabulaire en images Peabody: adaptation française du Peabody vocabulary test-revised : manuel pour les formes A et B*. Psycan.
- Federmeier, K. D., & Laszlo, S. (2009). Chapter 1 Time for meaning: electrophysiology provides insights into the dynamics of representation and processing in semantic memory. In H. R. Brian (Ed.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. Volume 51, pp. 1-44): Academic Press.
- Hillman, C. H., Buck, S. M., Themanson, J. R., Pontifex, M. B., & Castelli, D. M. (2009). Aerobic fitness and cognitive development: event-related brain potential and task performance indices of executive control in preadolescent children. *Developmental Psychology, 45*(1), 114-129.
- Hillman, C. H., Castelli, D. M., & Buck, S. M. (2005). Aerobic fitness and neurocognitive function in healthy preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 37*(11), 1967-1974.

- Holguin, S. R., Porjesz, B., Chorlian, D. B., Polich, J., & Begleiter, H. (1999). Visual P3a in male subjects at high risk for alcoholism. *Biological Psychiatry*, 46(2), 281-291.
- Janssen, I., & LeBlanc, A. G. (2010). Systematic review of the health benefits of physical activity and fitness in school-aged children and youth. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 7.
- Kamijo, K., Pontifex, M. B., O'Leary, K. C., Scudder, M. R., Wu, C.-T., Castelli, D. M., et al. (2011). The effects of an afterschool physical activity program on working memory in preadolescent children. *Developmental Science*, 1-13.
- Kiehl, K. A., Laurens, K. R., Duty, T. L., Forster, B. B., & Liddle, P. F. (2001). Neural sources involved in auditory target detection and novelty processing: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, 38(01), 133-142.
- Knight, R. T., Scabini, D., Woods, D. L., & Clayworth, C. C. (1989). Contributions of temporal-parietal junction to the human auditory P3. *Brain Research*, 502(1), 109-116.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(12), 463-470.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62(1), 621-647.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, 197, 792-795.
- Léger, L., Bosquet, L., & Folch, N. (1997, 11, 12 et 13 décembre). *Évaluation et développement des aptitudes aérobies au cours de la croissance*. Paper presented at the Colloque International des Cadres Techniques et Sportifs de la Guadeloupe | L'enfant, l'adolescent et le sport: croissance, maturation,

développement, santé et pratique des activités physique et sportives, Guadeloupe.

- Léger, L. A., Mercier, D., Gadoury, C., & Lambert, J. (1988). The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness. *Journal of Sports Sciences*, 6(2), 93 - 101.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, 21(2), 171-186.
- McCarthy, G., Nobre, A. C., Bentin, S., & Spencer, D. D. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: I. Intracranial distribution and neural generators. *Journal of Neuroscience*, 15(2), 1080-1089.
- Miller, J., Kranzler, J., Liu, Y., Schmalfluss, I., Theriaque, D. W., Shuster, J. J., et al. (2006). Neurocognitive findings in Prader-Willi syndrome and early-onset morbid obesity. *The Journal of Pediatrics*, 149(2), 192-192.
- Nobre, A. C., & McCarthy, G. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: II. Effects of word type and semantic priming. *Journal of Neuroscience*, 15(2), 1090-1098.
- Ogden, C. L., Flegal, K. M., Carroll, M. D., & Johnson, C. L. (2002). Prevalence and trends in overweight among US children and adolescents, 1999-2000. *Jama-Journal of the American Medical Association*, 288(14), 1728-1732.
- Ploughman, M. (2008). Exercise is brain food: the effects of physical activity on cognitive function. *Developmental Neurorehabilitation*, 11(3), 236 - 240.
- Polich, J. (2007). Updating p300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128-2148.
- Pontifex, M. B., Raine, L. B., Johnson, C. R., Chaddock, L., Voss, M. W., Cohen, N. J., et al. (2011). Cardiorespiratory fitness and the flexible modulation of

- cognitive control in preadolescent children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(6), 1332-1345.
- Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (1998). Section 2: Coloured Progressive Matrices *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales* (pp. 69). San Antonio, TX: Harcourt Assessment.
- Reynolds, G. D., & Richards, J. E. (2005). Familiarization, attention, and recognition memory in infancy: an event-related potential and cortical source localization study. *Developmental Psychology*, 41(4), 598-615.
- Shields, M. (2006). Overweight and obesity among children and youth. *Health Reports*, 17(3), 27-42.
- The Cooper Institute. (2007). *Fitnessgram/Activitygram Test Administration Manual* (4th ed.). Champaign, IL Human Kinetics.
- Tomprowski, P. D., Davis, C. L., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2008). Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Educational Psychology Review*, 20(2), 111-131.
- Tucker, D. M. (1993). Spatial sampling of head electrical fields: the geodesic sensor net *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 87(3), 154-163.
- Tuckman, B. W., & Hinkle, J. S. (1986). An experimental study of the physical and psychological effects of aerobic exercise on schoolchildren. *Health Psychology*, 5(3), 197-207.
- Vallieres, E. F., & Vallerand, R. J. (1990). Traduction et validation canadienne-française de l'échelle de l'estime de soi de Rosenberg. *International Journal of Psychology*, 25(3), 305.
- van Praag, H. (2008). Neurogenesis and exercise: past and future directions. *NeuroMolecular Medicine*, 10(2), 128-140.

- van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J., & Gage, F. H. (1999). Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(23), 13427-13431.
- Vaynman, S., Ying, Z., & Gomez-Pinilla, F. (2004). Hippocampal BDNF mediates the efficacy of exercise on synaptic plasticity and cognition. *European Journal of Neuroscience*, 20(10), 2580-2590.
- Verleger, R., Heide, W., Butt, C., & Kömpf, D. (1994). Reduction of P3b in patients with temporo-parietal lesions. *Cognitive Brain Research*, 2(2), 103-116.
- Wu, C. T., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Chaddock, L., Voss, M. W., Kramer, A. F., et al. (2011). Aerobic fitness and response variability in preadolescent children performing a cognitive control task. *Neuropsychology*, 25(3), 333-341.

Table 5.II. Participants' demographic data.

Variables	Control <i>M (SD)</i>	Experimental <i>M (SD)</i>
N (male)	17 (12 males)	19 (10 males)
Age (years)	9.1 (0.7)	9.1 (0.5)
IQ	30.9 (3.2)	32.7 (2.2)
SES	4.6 (0.8)	4.9 (0.3)
SEpre	32.4 (3.4)	32.7 (2.8)
SEpost	33.6 (4.1)	32.9 (4.2)
PApre (hrs per wk)	4.91 (2.71)	4.85(3.52)
PAduring (hrs per wk)	6.96 (3.96)	9.40 (4.56)

Note: N = number of participants; IQ = intellectual quotient (total score obtained for the Colored Progressive Matrices of Raven); SES = socioeconomic status; SEpre = self-esteem score pre-intervention (total score obtained with the Rosenberg self-esteem scale); SEpost = self-esteem score post-intervention; PApre = physical activity level pre-intervention; PAduring = physical activity level during the intervention.

Table 5.III. Independent t-tests for the time spent exercising in each intensity category

Exercise intensity	Control		Experimental		<i>t</i> (29)	<i>p</i>	95% CI		Cohen's <i>d</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>			LL	UL	
Very light (<50 % of HRmax)	22.98	16.57	9.26	8.28	3.07	.005	4.58	22.86	1.13
Light (50-63 % of HRmax)	42.05	16.37	30.90	7.27	2.61	.014	2.40	19.89	0.96
Moderate (64-76 % of HRmax)	20.63	11.01	31.42	4.04	-3.91	.001	-16.44	-5.15	-1.44
Vigorous (>77 % of HRmax)	14.34	14.60	28.41	12.81	-2.82	.009	-24.27	-3.88	-1.04

Table 5.IV. Fitness data.

Variables	Control <i>M (SD)</i>	Experimental <i>M (SD)</i>
BMI (kg/m ²)		
Pre	17.7 (2.3)	17.4 (2.1)
Post	17.6 (2.2)	17.7 (2.0)*
VO ₂ max (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)		
Pre	45.2 (4.2)	46.7 (3.8)
Post	48.9 (3.9)*	46.7 (3.8)
HRmax (bpm)		
Pre	201 (11)	201 (9)
Post	203 (9)	203 (10)
# push-ups		
Pre	12.4 (8.1)	12.6 (6.0)
Post	12.7 (7.5)	12.0 (7.4)
Flexibility (cm)		
Pre	33.8 (6.1)	28.8 (6.4)
Post	29.6 (5.8)*	30.8 (4.2)

Note: BMI = body mass index; HRmax = maximal heart rate achieved during the PACER test; # push-ups = maximal number of push-ups correctly completed; flexibility = maximal distance reach during the flexibility test; * = significant difference between post-test and pre-test ($p < .05$).

Table 5.V. Pearson Product-Moment correlations for exercise and cognitive variables.

Measures	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Time spent at vigorous intensity	–								
2. $\Delta V O_2$ max	-.133	–							
3. $\Delta P3b$ L (Pz)	.101	-.082	–						
4. $\Delta P3b$ A (Pz)	.203	-.261	.321	–					
5. ΔNc L (AFz)	.137	-.291	.264	.505*	–				
6. ΔNc A (AFz)	-.064	-.043	.130	.294	-.129	–			
7. $\Delta N400$ L (Pz)	.355	.177	-.091	-.081	-.268	-.167	–		
8. $\Delta N400$ A (Pz)	-.065	-.273	.427	.041	-.433	.489	.050	–	
9. $\Delta N400$ diff A (Pz)	.046	.112	-.162	.008	.116	-.011	.119	.235	–

Note: Δ = difference Post – Pre; L = latency; A = amplitude; * $p < .05$

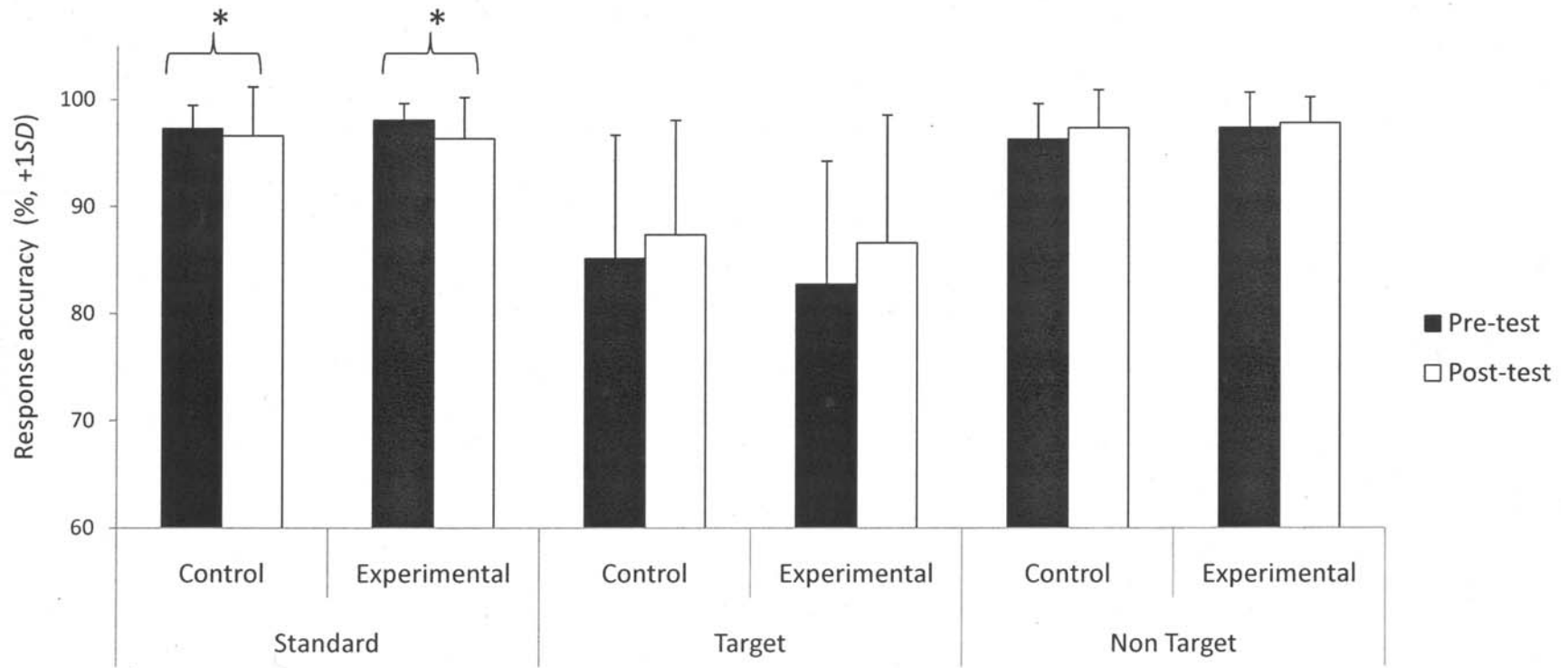


Figure 5.4. **Oddball task.** Response accuracy for each stimulus category.

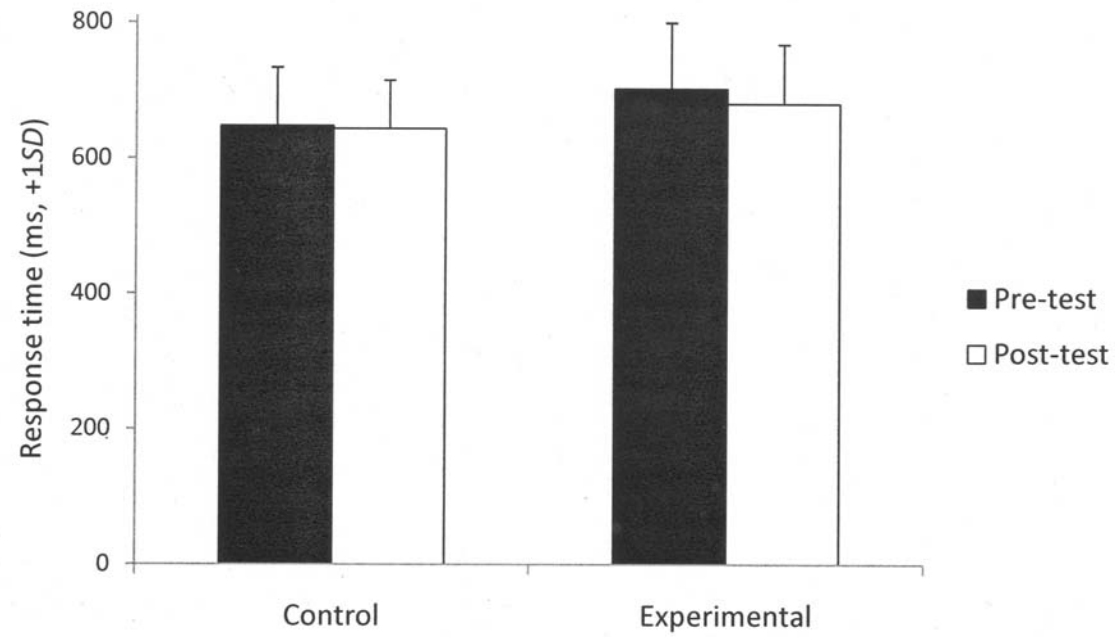


Figure 5.5. **Oddball task.** Response time for the target stimulus.

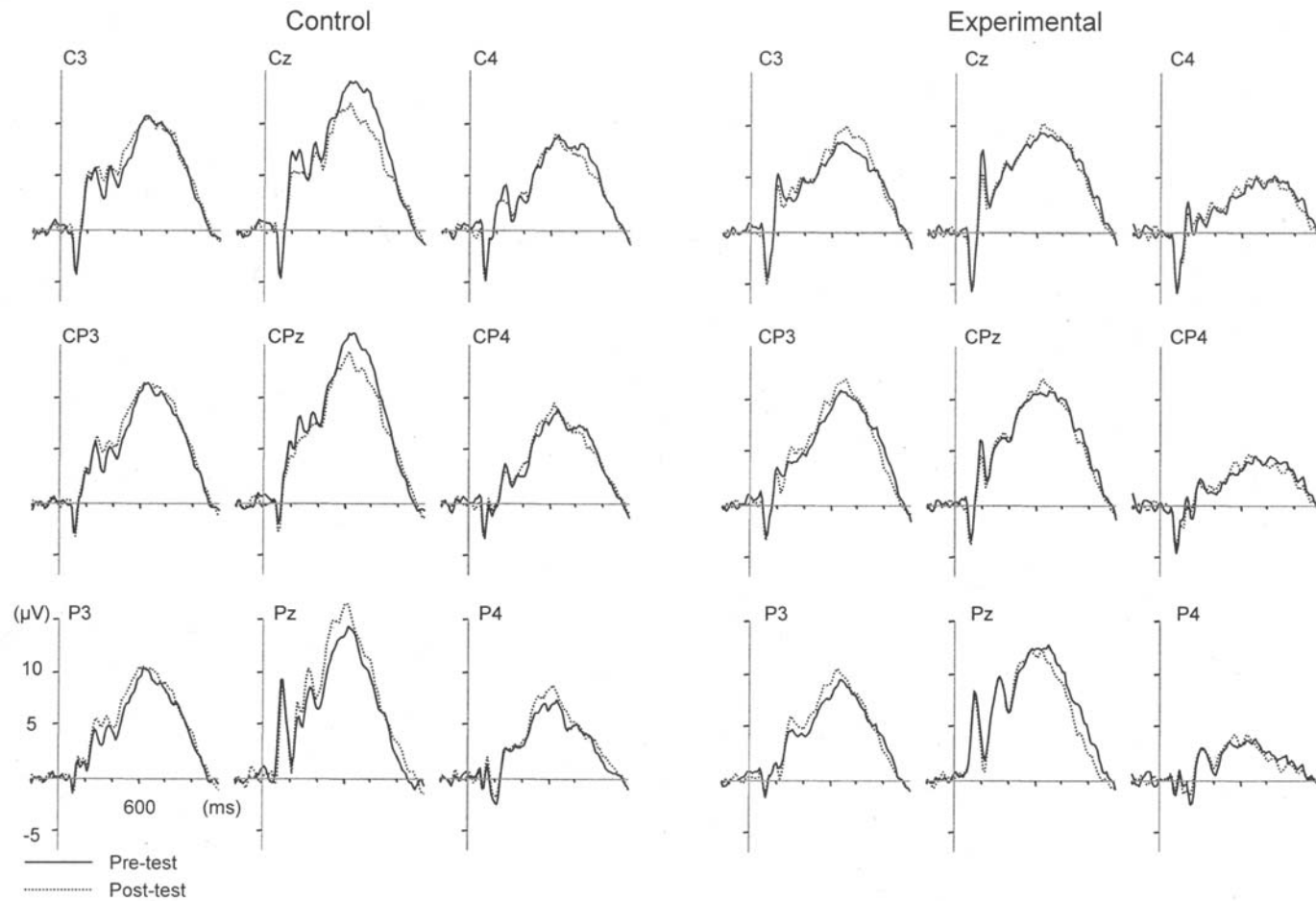


Figure 5.6. **P3b component.** Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the target stimulus over the centroparietal region.

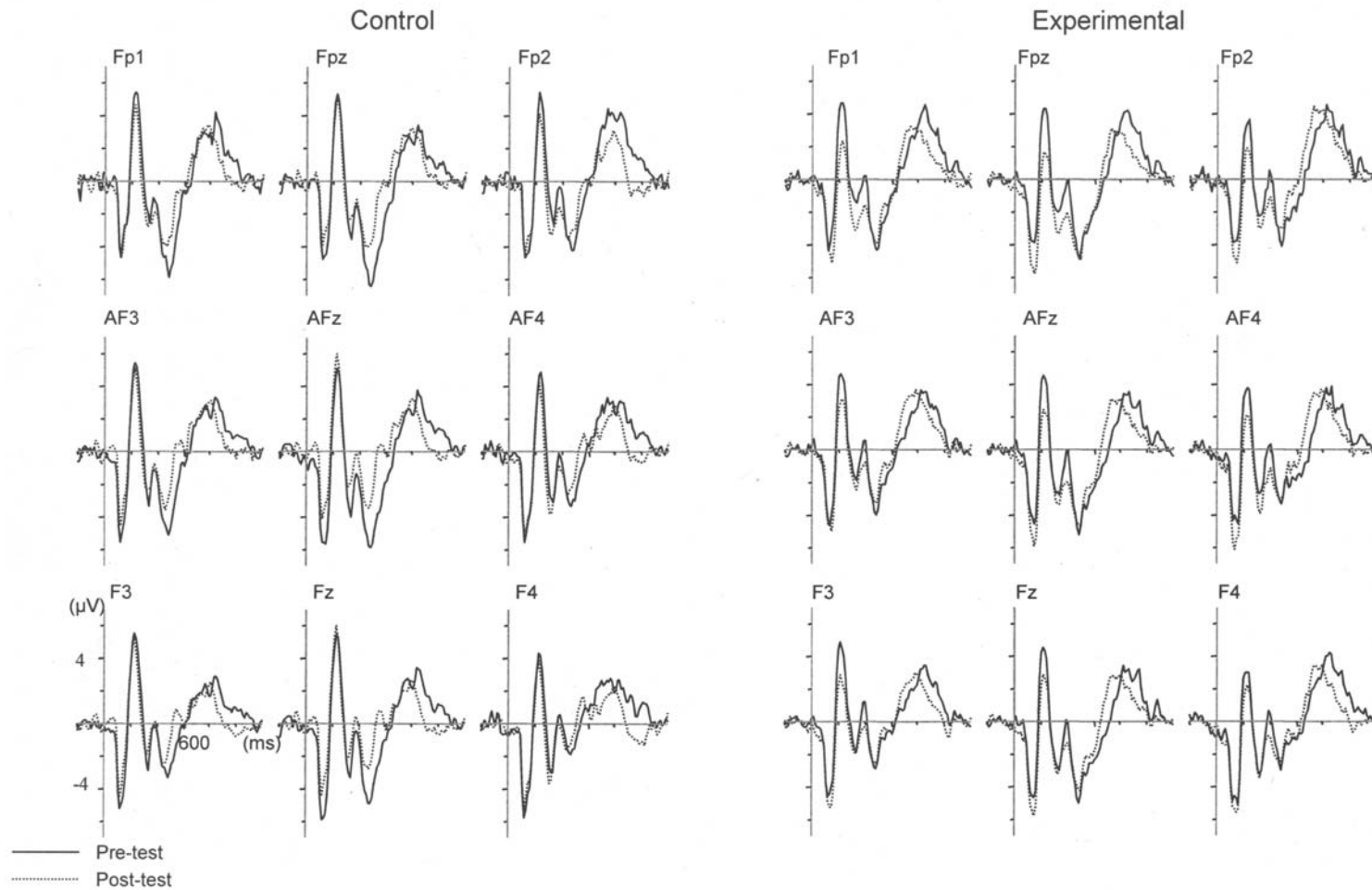


Figure 5.7. **Nc component.** Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the non target stimulus over the frontal region.

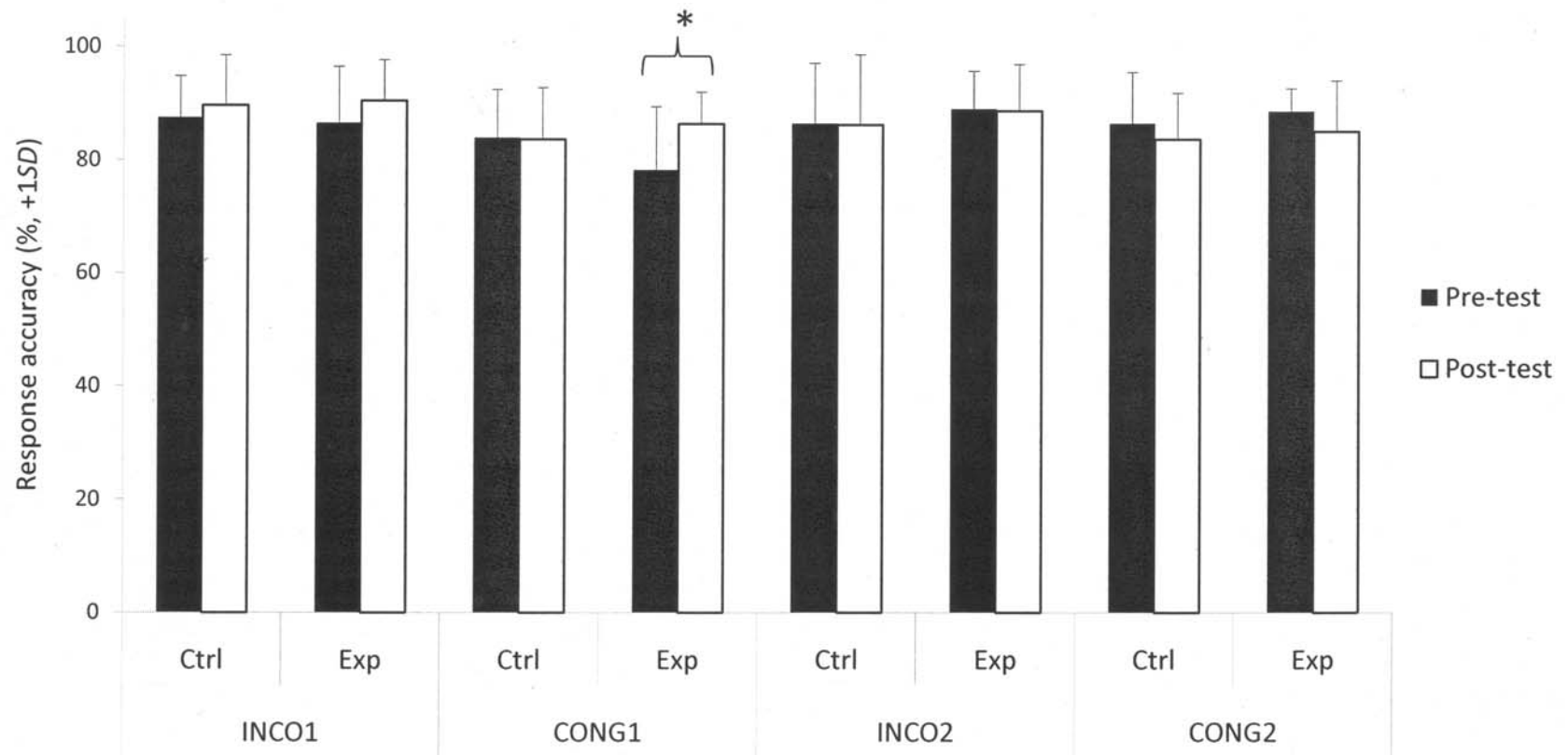


Figure 5.8. **Priming task.** Response accuracy for each stimulus category.

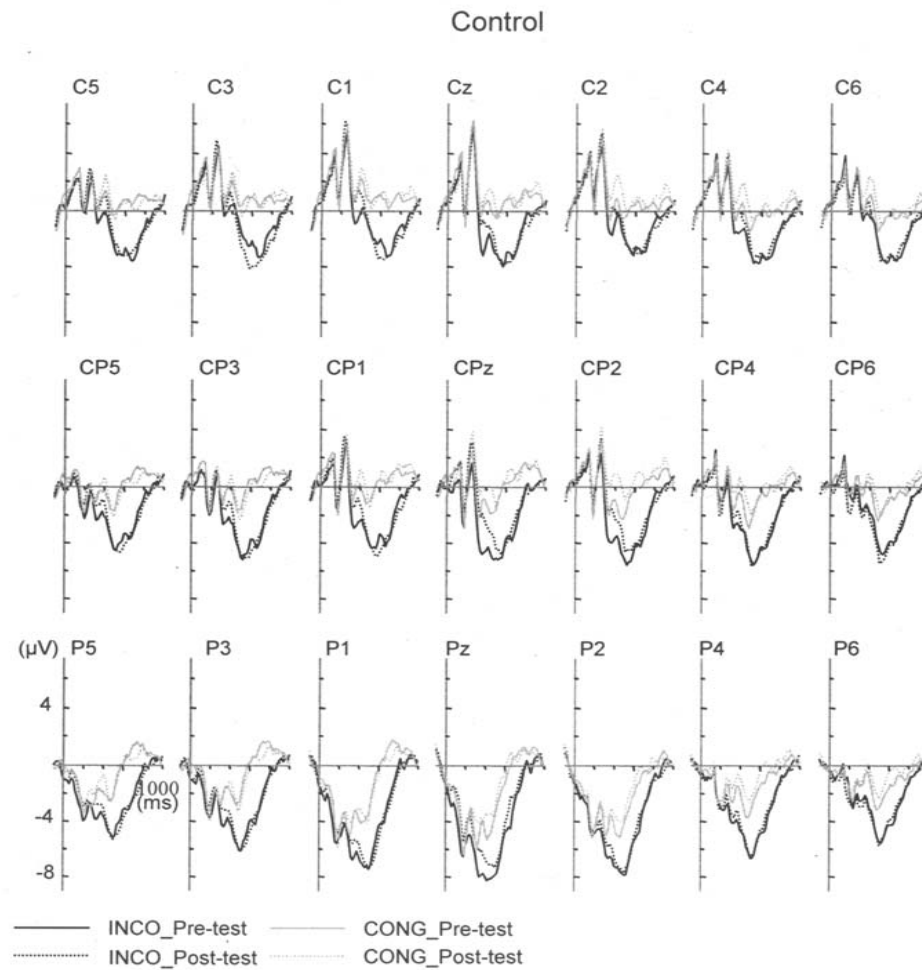


Figure 5.9a. **N400 component.** Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the INCO and CONG picture-word pairs over the centro-parietal region for the control group.

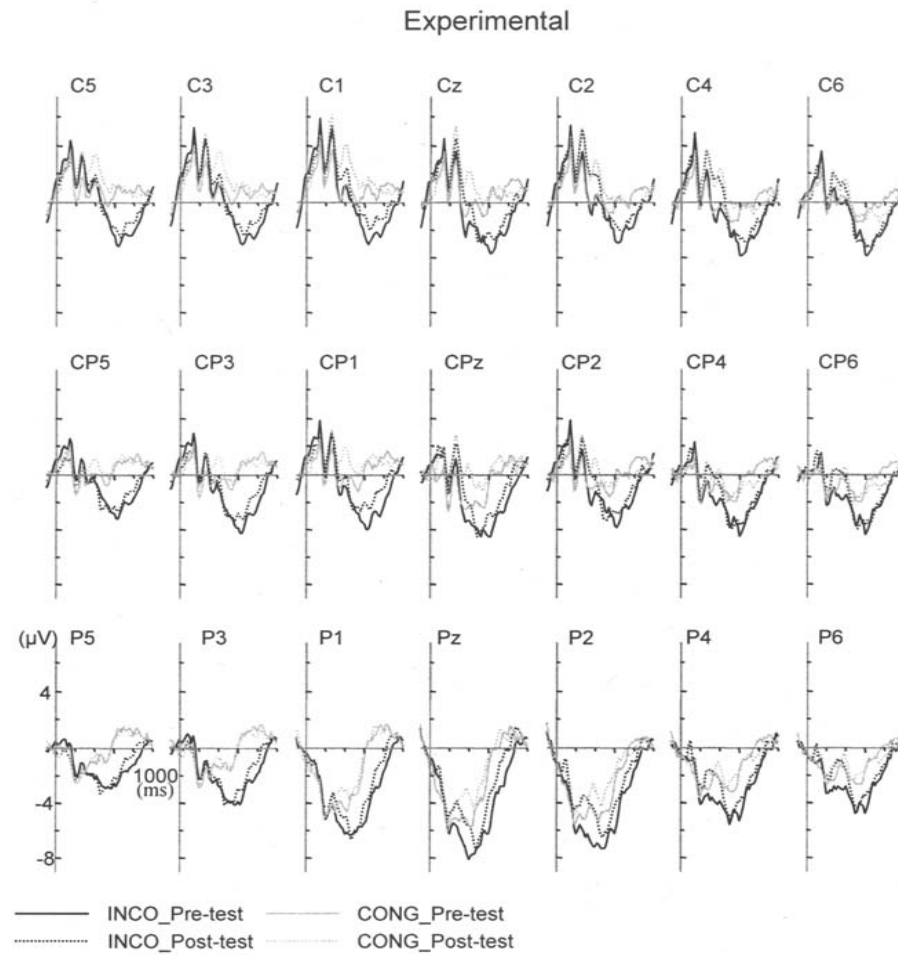


Figure 5.9b. **N400 component.** Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the INCO and CONG picture-word pairs over the centro-parietal region for the experimental group.

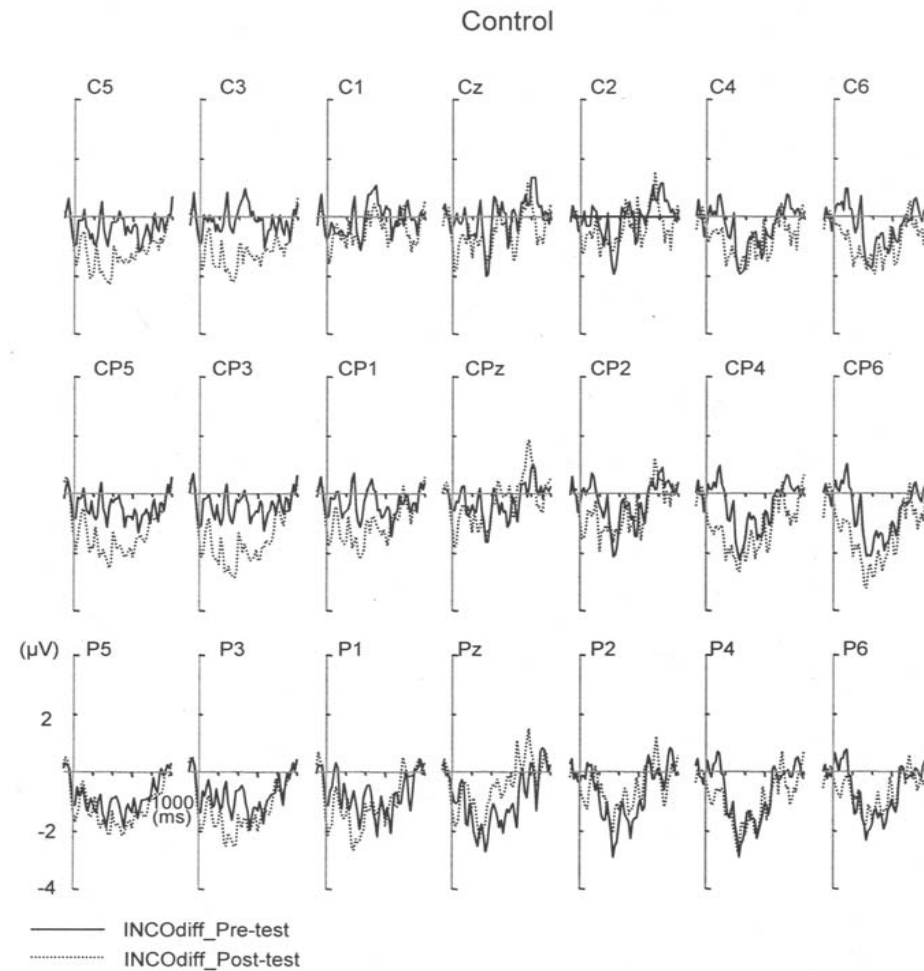


Figure 5.10a. **N400diff component.** Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the difference-waveform (INCO1 – INCO2) over the centro-parietal region for the control group.

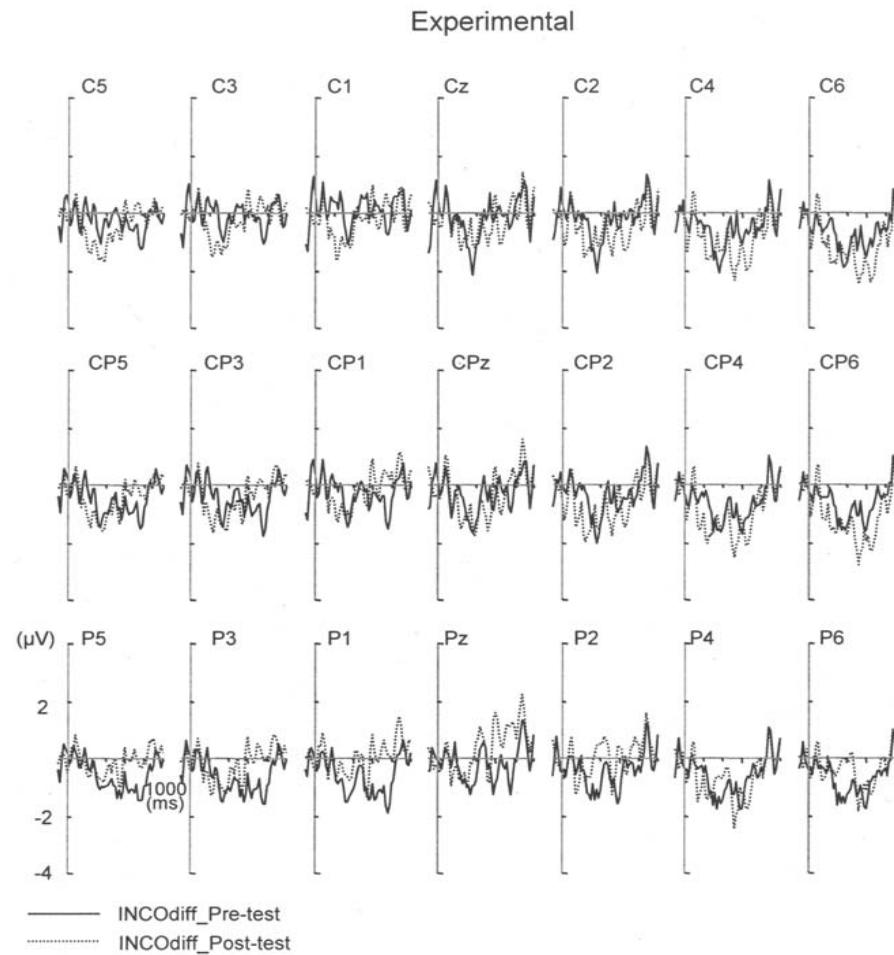


Figure 5.10b. **N400diff component.** Topographical distribution of grand average ERP waveforms for the difference-waveform (INCO1 – INCO2) over the centro-parietal region for the experimental group.

CHAPITRE 6

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif général de cette thèse était d'explorer les conséquences de l'exercice physique sur les mécanismes neurophysiologiques qui sous-tendent le fonctionnement cognitif chez l'enfant. Pour ce faire, les effets aigus et chroniques de l'exercice physique ont été examinés dans trois études à l'aide de mesures électrophysiologiques. Plus spécifiquement, une première étude a apprécié la durée de l'effet aigu de l'exercice physique sur la vigilance à partir de l'activité neurale spontanée. Dans une seconde étude, ce même effet d'exercice physique sur l'activité neurale a été examiné en lien avec l'âge des participants et la demande cognitive de la tâche. Finalement, une troisième étude a évalué l'effet chronique de l'exercice physique sur l'activité neurale dans le cadre d'un programme d'activités physiques. Les principaux résultats présentés dans cette thèse sont résumés ci-dessous.

- Étude 1) L'activité neurale spontanée du garçon âgé entre 9 et 11 ans est modifiée suite à un exercice physique sur vélo stationnaire d'une trentaine de minutes selon une intensité moyenne. Cet effet perdure au moins 30 min après la cessation de l'exercice et suggère une amélioration de la vigilance.
- Étude 2) Un exercice sur vélo stationnaire d'une trentaine de minutes selon une intensité moyenne est bénéfique à l'activité neurale associée au processus de mise à jour de la mémoire de travail, et ce, indépendamment de l'âge des participants. Ce même exercice physique est sans effet sur l'activité neurale associée au processus de capture de l'attention.
- Étude 3) Un programme d'activités physiques d'intensité moyenne à élevée de 12 semaines est sans effet sur la condition physique ou sur l'activité neurale associée à différents aspects du traitement de l'information (accès à la mémoire sémantique, mémoire à long terme, mémoire de travail, capture de

l'attention) chez des élèves de 3^e et 4^e années avec un niveau de condition physique élevé.

Les différentes sections de ce chapitre intégreront les résultats de la thèse à des discussions générales traitant : 1) de la durée des effets aigus de l'exercice physique; 2) de l'activation physiologique induite par l'exercice physique aigu et de ses répercussions sur le niveau d'éveil; 3) du modèle de capacité d'attention de Kahneman; 4) de l'explication neurochimique des effets aigus; et 5) d'une comparaison entre des effets aigus et chroniques de l'exercice physique sur la cognition en fonction de l'aptitude aérobie.

6.1 Durée des effets aigus

Dans cette thèse, deux études ont examiné les effets aigus de l'exercice physique sur l'activité neurale. L'intégration des résultats obtenus dans chacune d'elles permet d'enrichir les connaissances quant à la durée des effets sur le cerveau et les fonctions cognitives améliorées. La comparaison des études est facilitée par la similarité de nombreux aspects méthodologiques, notamment en ce qui a trait au stimulus d'exercice physique utilisé et à la fenêtre de temps des mesures électrophysiologiques post-exercice. Le Tableau 6.I détaille les caractéristiques des participants et de l'exercice physique de ces deux études. Selon les critères de classification de l'*American College of Sports Medicine* (2010) l'intensité de l'exercice physique dans chacune des études peut être qualifiée de moyenne (i.e. entre 64 et 76 % de la FCmax). Aussi, il est intéressant de souligner que les mesures électrophysiologiques ont été initiées au même moment, c'est-à-dire 10 min après la cessation de l'exercice physique et qu'elles ont pris fin lors de la mesure 30 min post-exercice (étude 1) et environ 32 min post-exercice dans l'étude 2. Ultiment, l'analyse spectrale de l'EEG de même que l'étude des ERP mènent à des résultats complémentaires et à des conclusions analogues. Elles supportent l'hypothèse qu'un exercice physique d'une trentaine de minutes selon une intensité moyenne induit des effets bénéfiques sur le cerveau de l'enfant qui perdurent au moins 30 min.

Tableau 6.I. Caractéristiques des participants et de l'exercice physique

Titre de l'étude	Caractéristiques des participants			Caractéristiques de l'exercice physique			
	N	Genre (G/F)	Âge (ans)	Ergomètre	Durée (min)	Intensité moyenne (bpm)	Intensité relative (%FCmax) ^a
1. <i>The effect of acute exercise on brain activation in children</i>	12	12 G	10,8 ± 0,7	Vélo stationnaire	36	137 ± 6	70
2. <i>Acute exercise and electrophysiological indices of cognition during development</i>	16	7 G / 9 F	9,0 ± 0,4	Vélo stationnaire	30	148 ± 11	76
	16	7 G / 9 F	11,8 ± 0,6	Vélo stationnaire	30	149 ± 10	76

Note : N = nombre de participants; ^a = calculé à partir d'une FCmax de 195 bpm

D'un point de vue pratique, ces résultats suggèrent que l'amélioration du fonctionnement cognitif suite à une séance d'exercice physique est suffisamment durable pour avoir des répercussions concrètes et positives en milieu scolaire. Cependant, il importe de rappeler que nous n'avons pas trouvé d'amélioration en ce qui a trait à la performance comportementale pour la tâche d'« *oddball* » et que la taille des effets (*d* de Cohen) rapportées se situent entre .24 et .35. Selon les critères de classification de Cohen (1988), il s'agit d'un effet relativement petit dont la subtilité est difficilement perceptible dans la vie de tous les jours. Bref, l'exercice physique est sans contredit bénéfique au fonctionnement cognitif, mais ses retombées sont assez limitées. D'ailleurs pour comprendre l'impact réel de l'exercice physique, il semble pertinent d'élaborer des protocoles de recherche qui concilieront à la fois des mesures précises du fonctionnement cognitif et des habiletés scolaires. On sait par exemple que des fonctions exécutives comme la mémoire de travail et l'inhibition sont particulièrement importantes pour la réussite scolaire en mathématiques et en lecture (Bull & Scerif, 2001; St Clair-Thompson & Gathercole, 2006). Aussi, dans le but de cerner précisément la persistance des effets, d'éventuelles recherches devront élargir la fenêtre de temps pour les mesures post-exercice chez l'enfant. À ce jour, des données recueillies chez l'adulte permettent de spéculer quant à un effet qui persisterait au moins 60 min (Hillman, Snook, & Jerome, 2003; Magnie et al., 2000).

6.2 L'activation physiologique induite par l'exercice physique aigu

Tel qu'il a été discuté dans la précédente section, les résultats obtenus quant à la persistance des effets sont assez uniformes. Toutefois, l'absence de changement dans l'état de vigilance lors de la mesure 10 min post-exercice vient nuancer cette conclusion. D'ailleurs, ce résultat peut sembler contradictoire à l'état actuel de la littérature considérant que de nombreuses études ont révélé des effets positifs sur le fonctionnement cognitif dans les 5 min suivant la cessation de l'exercice (Caterino & Polak, 1999; ElleMBERG & St-Louis-Deschenes, 2010; Gabbard & Barton, 1979; McNaughten & Gabbard, 1993).

Dans un contexte où l'on attribue les effets aigus de l'exercice physique sur le fonctionnement cognitif à une augmentation du niveau d'éveil ou d'activation de l'organisme, il est important de dissocier le concept de niveau d'éveil de celui de la vigilance. Ainsi, malgré leurs similitudes et le fait qu'ils varient généralement ensemble, ils demeurent des concepts non identiques (Parasuraman, Warm, & See, 1998). Outre les mesures de l'activité neurale, plusieurs indices physiologiques peuvent servir à évaluer le niveau d'éveil dont une augmentation du rythme cardiaque, de la conductance cutanée et de la dilatation de la pupille (Kahneman, 1973). Or, une mesure comme la conductance cutanée n'est pas systématiquement associée à celle de l'activité cérébrale spontanée (Barry et al., 2004).

En tenant compte des différents indices physiologiques du niveau d'éveil, il est possible de proposer un modèle dans lequel au moins deux réponses physiologiques, avec des cinétiques distinctes, auraient des effets positifs sur le fonctionnement cognitif. Bien que cela demeure hautement spéculatif, on peut penser que les effets les plus immédiats de l'exercice physique seraient attribuables à une fréquence cardiaque supérieure à la valeur de repos tandis que les effets plus tardifs seraient davantage associés à une modification de l'activité neurale et de la vigilance. Il n'est pas exclu que ces deux réponses puissent se superposer à un certain moment.

Des recherches ont d'ailleurs montré que l'amplitude de la composante P3 était augmentée suite à l'exercice physique et ce, même si la fréquence cardiaque était revenue à des valeurs de repos (Hillman, Pontifex, et al., 2009; Hillman et al., 2003; Magnie et al., 2000). Par contre, l'interaction entre la fréquence cardiaque post-exercice et la performance cognitive nécessite d'être documentée.

Bref, l'effet bénéfique de l'exercice physique sur la vigilance suite à l'exercice physique apparaît comme l'un des facteurs explicatifs à l'augmentation de l'amplitude de la composante P3b trouvée dans l'étude 2.

6.3 Modèle de capacité d'attention de Kahneman

Dans l'introduction de ce manuscrit, différents modèles théoriques permettant d'expliquer la relation entre l'exercice physique aigu et le fonctionnement cognitif ont été exposés. Les résultats obtenus dans cette thèse quant aux effets aigus de l'exercice physique s'intègrent relativement bien au modèle de capacité d'attention proposé par Kahneman (1973) (voir Figure 6.1). Selon ce modèle, la capacité d'attention est un facteur limitant de la performance cognitive. Kahneman stipule également que la capacité d'attention et le niveau d'éveil d'un individu sont deux concepts interdépendants qui varient ensemble. Il regroupe les éléments pouvant influencer le niveau d'éveil selon deux grandes catégories : la demande imposée par la tâche et les divers déterminants du niveau d'éveil parmi lesquels on peut considérer l'exercice physique.

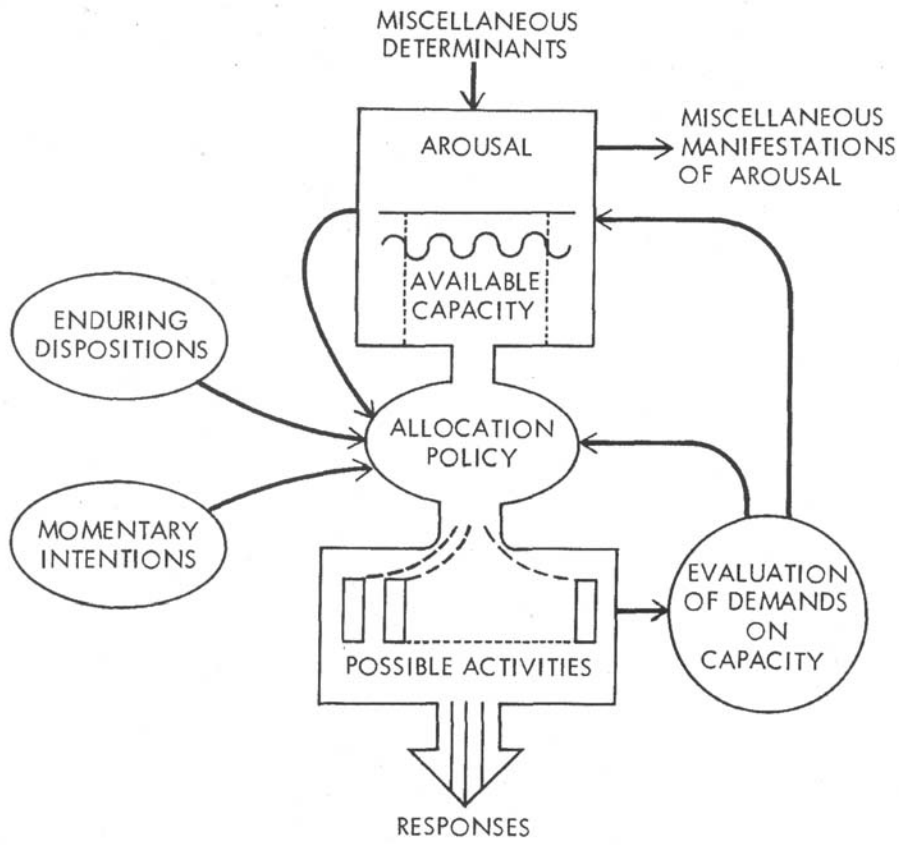


FIGURE 1-2
A capacity model for attention.

Figure 6.1. Modèle de capacité d'attention (tirée de Kahneman 1973).

La Figure 6.2 propose une adaptation du modèle de Kahneman dans lequel sont intégrés les résultats de cette thèse de même que la relation conceptuelle entre l'attribution de la capacité d'attention et la modulation de la composante P300 proposée par Polich (2007). Ainsi, un exercice physique d'une trentaine de minutes selon une intensité moyenne stimulerait le niveau d'éveil et, par conséquent, augmenterait la capacité d'attention disponible. Dans l'étude 1, le changement d'éveil s'est manifesté par une élévation de la puissance spectrale relative dans la bande alpha2 et une réduction concomitante de puissance dans la bande alpha1 qui ont été interprétées comme une augmentation de la vigilance. Dans l'étude 2, la demande cognitive de la tâche demeure constante puisque le même test est utilisé pour la condition pré et post-exercice. Conséquemment, une plus grande capacité d'attention a donc pu être allouée à la performance cognitive lors de la condition post-exercice. Selon les résultats de l'étude 2, cela se traduit par une augmentation de l'amplitude de la composante P3b que nous avons interprétée comme une facilitation dans l'attribution des ressources neurales lors de la mise à jour de l'information en mémoire de travail.

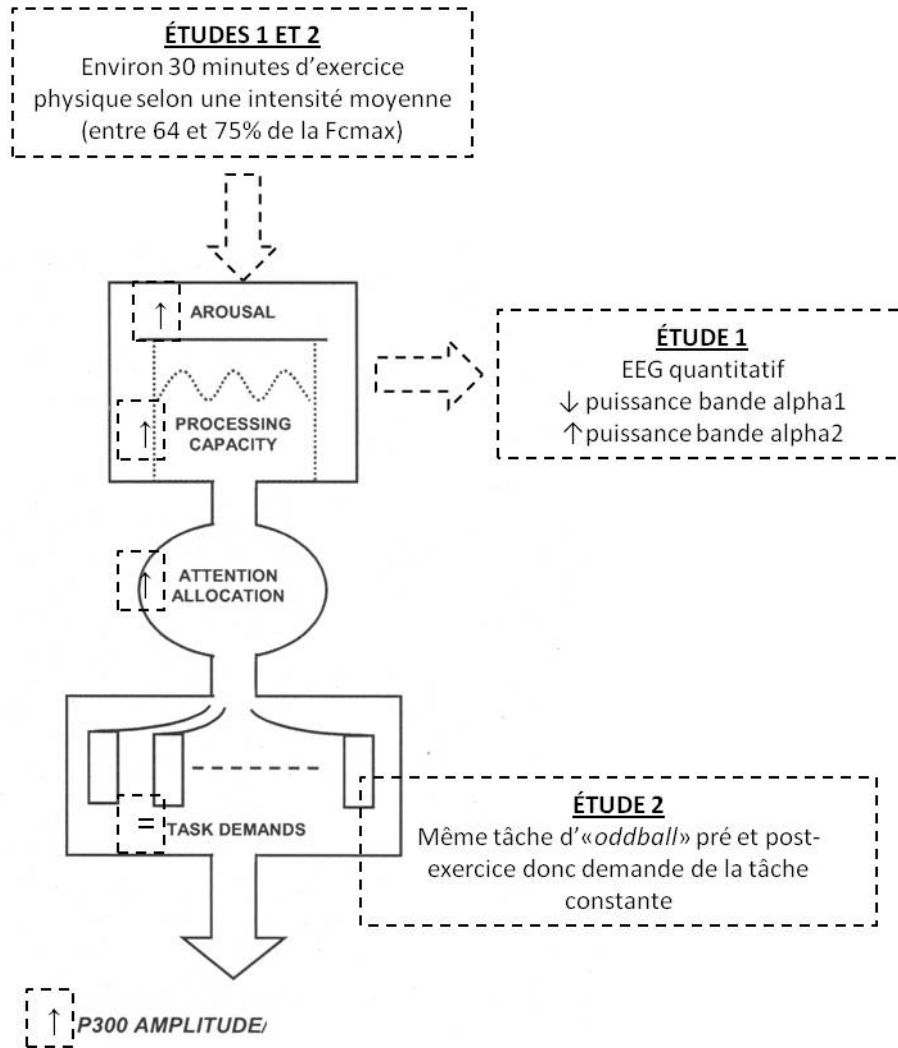


Fig. 3. Schematic illustration of how attentional resources affect P300 (after Kahneman, 1973). This model reflects a general framework for viewing how attentional resources can affect P300 measures. Overall arousal level determines the amount of processing capacity available for attention allocation to on-going tasks. More difficult or multiple task demands reduce P300 amplitude and lengthen peak latency. Reprinted with permission from Academic Press (Copyright 1973).

Figure 6.2. Relation conceptuelle entre l'attribution de la capacité d'attention et la modulation de la composante P300. Les encadrés pointillés ont été ajoutés pour illustrer les effets de l'exercice physique (adaptée de Polich 2007).

Tel qu'il a été discuté dans l'article 2, l'augmentation de la capacité d'attention suite à l'exercice physique n'est pas systématiquement bénéfique à tous les aspects du traitement de l'information. En effet, la relation entre la capacité d'attention et le fonctionnement cognitif serait modulée par la demande cognitive de la tâche (Norman & Bobrow, 1975) (voir Figure 6.3). Ainsi, un processus relativement simple, tel que celui de la capture de l'attention qui est mesuré par la N_c , ne bénéficie pas de l'exercice physique puisqu'au repos, les ressources d'attention disponibles sont déjà amplement suffisantes.

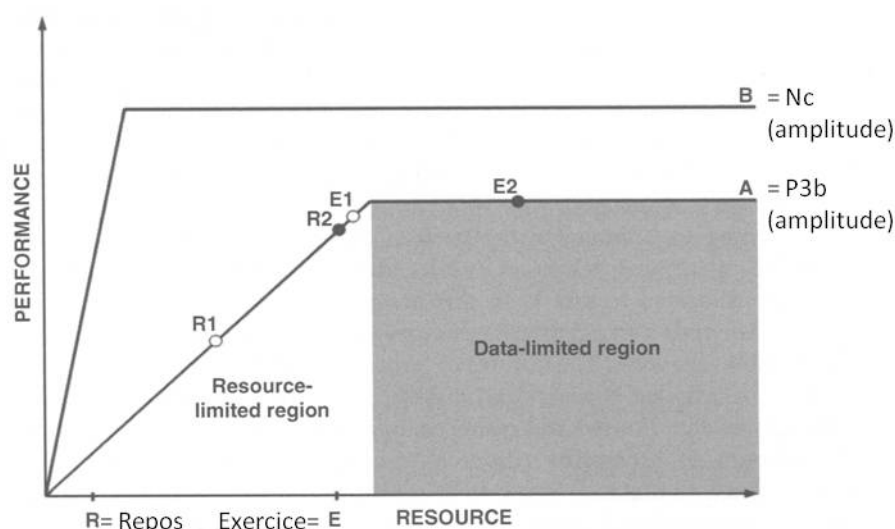


Figure 1.4 The Norman and Bobrow performance-resource function (see text for more explanation).

Figure 6.3. Adaptation de la relation performance-ressource de Norman et Bobrow (1975) (tirée d'Audiffren 2009).

6.4 Explication neurochimique

Dans cette thèse aucune mesure directe de l'activité des neurotransmetteurs n'a été documentée, cependant il est tout de même possible de tenter d'inférer le ou les systèmes les plus susceptibles d'être modulés par l'exercice physique. À cet effet, McMorris (2009) suggère que la relation entre l'exercice physique et la cognition passe par un changement dans l'activité des neurones catécholaminergiques

(adrénaline, noradrénaline, dopamine). Cette hypothèse découle en partie de la recherche sur le modèle animal qui révèle des modifications dans la synthèse et le métabolisme des neurotransmetteurs catécholaminergiques du cerveau lors de l'exercice physique aigu (pour une revue (Meeusen & Demeirleir, 1995)), mais aussi de la recherche chez l'humain qui suggère une relation entre les concentrations plasmatiques de catécholamines ou de leurs métabolites à l'exercice physique et la performance cognitive (Chmura, Nazar, & Kaciubauscilko, 1994; McMorris, Collard, Corbett, Dicks, & Swain, 2008; McMorris et al., 1999). Les résultats dévoilés dans cette thèse supportent partiellement l'hypothèse catécholaminergique puisque les mesures qui se sont révélées sensibles à l'exercice physique : la vigilance et la composante P3b sont toutes deux intimement liées à l'activité des neurones noradrénergiques (Parasuraman et al., 1998; Polich & Criado, 2006).

6.5 Exercice physique et cognition : rôle de l'aptitude aérobie

Dans l'étude 3, l'aptitude aérobie élevée des participants a été proposée comme facteur explicatif de l'absence de changement dans la performance cognitive suite au programme d'activités physiques. On peut donc se demander si les enfants ayant une aptitude cardiovasculaire supérieure retirent de quelconques avantages cognitifs de toute pratique supplémentaire d'activités physiques. Peuvent-ils au moins profiter des bienfaits aigus de l'activité physique? Malgré l'utilisation d'une tâche cognitive identique, la comparaison entre les résultats de l'étude 2 et 3 apporte difficilement réponse à cette question, car la fonction cardiovasculaire des participants de l'étude 2 est nettement inférieure ($M = 37.7$ $SD = 5.8$ mL d'O₂·kg⁻¹·min⁻¹) à celle des enfants de l'étude 3 ($M = 46.7$ $SD = 3.8$ mL d'O₂·kg⁻¹·min⁻¹).

Toutefois, l'état de la littérature permet d'avancer certaines pistes de réponses. En effet, certaines recherches traitant de l'effet aigu de l'exercice physique ont documenté la condition physique des participants (Hillman et al., 2003; Zervas et al., 1991). On y constate que les participants dont l'aptitude aérobie est supérieure à 55 mL d'O₂·kg⁻¹·min⁻¹ retirent des bénéfices cognitifs d'une séance ponctuelle d'exercice physique alors qu'un programme d'entraînement rigoureux de 25

semaines est sans effet chez ces mêmes participants (Zervas et al., 1991). Des travaux, chez l'adulte, ont également conclu que l'effet aigu de l'exercice physique était indépendant de la condition physique des participants (Magnie et al., 2000). Bref, ces résultats suggèrent que peu importe la condition physique d'un enfant (moyenne ou élevée) ce dernier peut retirer des bénéfices cognitifs d'une séance ponctuelle d'exercice physique alors que les gains en lien avec les effets chroniques seraient déjà atteints.

6.7 Limites de la thèse

Cette thèse comporte évidemment un certain nombre de limites. En ce qui a trait aux études portant sur les effets aigus de l'exercice physique, je soulignerai celles qui m'apparaissent les plus importantes et qui devraient être prises en compte dans l'élaboration de futurs protocoles de recherche. L'une d'elles, et probablement la plus sérieuse, est l'absence de condition témoin. Effectivement, bien que les mesures post-exercice aient été comparées à des valeurs de repos, on ignore si une condition témoin de nature intellectuelle (ex. lecture, jeux vidéo) aurait eu des effets comparables sur le fonctionnement cognitif. Le choix de soumettre nos participants à un exercice continu sur vélo stationnaire limite également l'interprétation de nos résultats puisque que ce type d'effort est peu représentatif de la pratique spontanée d'activités physiques chez l'enfant qui est plutôt de nature intermittente. Effectivement, une alternance entre des périodes de repos et de brefs exercices d'intensité élevée aurait sans doute été plus écologique. Il faut également considérer la présence d'un biais dans la sélection des participants. Effectivement, ces derniers ont été recrutés dans un camp sportif. Il est donc difficile de déterminer si les résultats s'appliquent à des enfants qui démontrent moins d'intérêt dans la pratique d'activités physiques.

L'obstacle le plus important à l'interprétation des résultats portant sur l'effet chronique de l'exercice physique est sans contredit l'absence de changement dans l'aptitude aérobie chez les participants qui ont bénéficié du programme d'activités physiques. Étant donné que la vérification de nos hypothèses dépendait d'une

amélioration de la fonction cardiovasculaire et que nous n'avons pu rencontrer cet objectif, la discussion des résultats de cette étude est fortement orientée sur la spéculation. En effet, il est impossible de déterminer si l'absence de changement dans la performance cognitive est tributaire d'un volume d'intervention insuffisant, de l'absence d'amélioration de l'aptitude aérobie ou s'il faut tout simplement conclure que l'activité physique est sans effet sur les fonctions qui ont été examinées. À ce propos, je recommanderais l'introduction de tests évaluant les fonctions exécutives à tout protocole de recherche portant sur les effets chroniques de l'exercice physique.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahamed, Y., MacDonald, H., Reed, K., Naylor, P.-J., Liu-Ambrose, T., & McKay, H. (2007). School-based physical activity does not compromise children's academic performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(2), 371-376. doi: 10.1249/01.mss.0000241654.45500.8e
- American College of Sports Medicine. (2010). Benefits and risks associated with physical activity. In W. R. Thompson, N. F. Gordon & L. S. Pescatello (Eds.), *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription* (8th ed., pp. 2-17). Philadelphia: Wolters Kluwer | Lippincott Williams & Wilkins.
- Audiffren, M. (2009). Acute exercise and psychological functions: a cognitive-energetic approach. In T. McMorris, P. Tomporowski & M. Audiffren (Eds.), *Exercise and cognitive function* (pp. 3-39). Chichester: Wiley-Blackwell.
- Barnes, D. E., Yaffe, K., Satariano, W. A., & Tager, I. B. (2003). A longitudinal study of cardiorespiratory fitness and cognitive function in healthy older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 51(4), 459-465. doi: 10.1046/j.1532-5415.2003.51153.x
- Barrett, S. E., & Rugg, M. D. (1989). Event-related potentials and the semantic matching of faces. *Neuropsychologia*, 27(7), 913-922.
- Barry, R. J., Clarke, A. R., McCarthy, R., Selikowitz, M., Rushby, J. A., & Ploskova, E. (2004). EEG differences in children as a function of resting-state arousal level. *Clinical Neurophysiology*, 115(2), 402-408. doi: 10.1016/s1388-2457(03)00343-2

- Bentin, S. (1987). Event-related potentials, semantic processes, and expectancy factors in word recognition. *Brain and Language*, *31*(2), 308-327. doi: Doi: 10.1016/0093-934x(87)90077-0
- Bentin, S., McCarthy, G., & Wood, C. C. (1985). Event-related potentials, lexical decision and semantic priming. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *60*(4), 343-355. doi: Doi: 10.1016/0013-4694(85)90008-2
- Best, J. R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*, *30*(4), 331-351. doi: 10.1016/j.dr.2010.08.001
- Bledowski, C., Prvulovic, D., Hoehstetter, K., Scherg, M., Wibrall, M., Goebel, R., & Linden, D. E. J. (2004). Localizing P300 generators in visual target and distractor processing: A combined event-related potential and functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, *24*(42), 9353-9360. doi: 10.1523/jneurosci.1897-04.2004
- Brown, C., & Hagoort, P. (1993). The processing nature of the N400: evidence from masked priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *5*(1), 34-44.
- Buck, S. M., Hillman, C. H., & Castelli, D. M. (2008). The relation of aerobic fitness to stroop task performance in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *40*(1), 166-172. doi: 10.1249/mss.0b013e318159b035
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietrassyk-Kendziorra, S., Machado, S., Ribeiro, P., & Arafat, A. M. (2010). Steroid hormones in the saliva of adolescents after different exercise intensities and their influence on working memory in a school setting. *Psychoneuroendocrinology*, *35*(3), 382-391. doi: 10.1016/j.psyneuen.2009.07.015

- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietrassyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P., & Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience Letters*, *441*(2), 219-223. doi: 10.1016/j.neulet.2008.06.024
- Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, *19*(3), 273-293. doi: 10.1207/s15326942dn1903_3
- Byrne, J. M., Connolly, J. F., MacLean, S., Dooley, J. M., Gordon, K. E., & Beattie, T. L. (1999). Brain activity and language assessment using event-related potentials: development of a clinical protocol. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *41*(11), 740-747.
- Cajochen, C., Brunner, D. P., Kräuchi, K., Graw, P., & Wirz-Justice, A. (1995). Power density in theta/alpha frequencies of the waking EEG progressively increases during sustained wakefulness. *Sleep*, *18*(10), 890-894.
- Cassilhas, R. C., Viana, V. A. R., Grassmann, V., Santos, R. T., Santos, R. F., Tufik, S., & Mello, M. T. (2007). The impact of resistance exercise on the cognitive function of the elderly. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(8), 1401-1407. doi: 10.1249/mss.0b013e318060111f
- Castelli, D. M., Hillman, C. H., Hirsch, J., Hirsch, A., & Drollette, E. (2011). FIT Kids: Time in target heart zone and cognitive performance. *Preventive Medicine*, *52*(Supplement 1), S55-S59. doi: 10.1016/j.ypmed.2011.01.019

Caterino, M. C., & Polak, E. D. (1999). Effects of two types of activity on the performance of second-, third-, and fourth-grade students on a test of concentration. *Perceptual and Motor Skills, 89*(1), 245-248.

Centers for Disease Control and Prevention. (2010). *The association between school-based physical activity, including physical education, and academic performance*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services.

Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Kim, J. S., Voss, M. W., VanPatter, M., . . . Kramer, A. F. (2010). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain Research, 1358*, 172-183. doi: 10.1016/j.brainres.2010.08.049

Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., VanPatter, M., Voss, M. W., Pontifex, M. B., . . . Kramer, A. F. (2010). Basal ganglia volume is associated with aerobic fitness in preadolescent children. *Developmental Neuroscience, 32*(3), 249-256. doi: 10.1159/000316648

Chaddock, L., Hillman, C. H., Buck, S. M., & Cohen, N. J. (2011). Aerobic fitness and executive control of relational memory in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 43*(2), 344-349. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181e9af48

Chmura, J., Nazar, K., & Kaciubauscilko, H. (1994). Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds *International Journal of Sports Medicine, 15*(4), 172-176. doi: 10.1055/s-2007-1021042

- Christie, B., Eadie, B., Kannangara, T., Robillard, J., Shin, J., & Titterness, A. (2008). Exercising our brains: how physical activity impacts synaptic plasticity in the dentate gyrus. *NeuroMolecular Medicine*, *10*(2), 47-58.
- Clarkson-Smith, L., & Hartley, A. A. (1989). Relationships between physical exercise and cognitive abilities in older adults. *Psychology and Aging*, *4*(2), 183-189. doi: 10.1037/0882-7974.4.2.183
- Coch, D., Maron, L., Wolf, M., & Holcomb, P. J. (2002). Word and picture processing in children: An event-related potential study. *Developmental Neuropsychology*, *22*(1), 373 - 406.
- Coe, D. P., Pivarnik, J. M., Womack, C. J., & Reeves, M. J. (2006). Effect of physical education and activity levels on academic achievement in children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *38*(8), 1515-1519. doi: 10.1249/01.mss.0000227537.13175.1b
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Colcombe, S., & Kramer, A. F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults: A meta-analytic study. *Psychological Science*, *14*(2), 125-130.
- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N. J., . . . Elavsky, S. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *101*(9), 3316-3321.
- Comerchero, M. D., & Polich, J. (1999). P3a and P3b from typical auditory and visual stimuli. *Clinical Neurophysiology*, *110*(1), 24-30.

- Comité scientifique de Kino-Québec. (2011). *L'activité physique, le sport et les jeunes -- Savoir et agir*. Secrétariat au loisir et au sport, ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.
- Connolly, J. F., Byrne, J. M., & Dywan, C. A. (1995). Assessing adult receptive vocabulary with event-related potentials: An investigation of cross-modal and cross-form priming. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *17*(4), 548 - 565.
- Courchesne, E. (1977). Event-related brain potentials: Comparison between children and adults. *Science*, *197*(4303), 589-592.
- Courchesne, E. (1978). Neurophysiological correlates of cognitive development: Changes in long-latency event-related potentials from childhood to adulthood. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *45*, 468-482.
- Courchesne, E. (1987). A neurophysiological view of autism. In E. Schopler & G. B. Mesibov (Eds.), *Neurobiological issues in autism* (pp. 285-324). New York: Plenum Press.
- Courchesne, E. (1990). Chronology of postnatal human brain development: event-related potential, positron emission tomography, myelinogenesis, and synaptogenesis studies. In J. W. Rohrbaugh, R. Parasuraman & R. Johnson (Eds.), *Event-related brain potentials: basic issues and applications* (pp. 210-241). New York: Oxford University Press.
- Courchesne, E., Elmasian, R. O., & Yeung-Courchesne, R. (1987). P3b and Nc: Basic clinical and developmental research. In A. M. Halliday, S. R. Butler & R. Paul (Eds.), *A textbook of clinical neurophysiology* (pp. 645-676). Chichester: John Wiley & Sons.

- Courchesne, E., Ganz, L., & Norcia, A. M. (1981). Event-related brain potentials to human faces in infants. *Child Development, 52*(3), 804-811.
- Courchesne, E., Hillyard, S. A., & Galambos, R. (1975). Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 39*, 131-143.
- Csibra, G., Kushnerenko, E., & Grossmann, T. (2008). Electrophysiological methods in studying infant cognitive development. In C. A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (2 ed., pp. 247-262). Cambridge: MIT Press.
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia, 44*(11), 2037-2078. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., McDowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E., . . . Naglieri, J. A. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: A randomized, controlled trial. *Health Psychology, 30*(1), 91-98. doi: 10.1037/a0021766
- Deacon, D., Dynowska, A., Ritter, W., & Grose-Fifer, J. (2004). Repetition and semantic priming of nonwords: Implications for theories of N400 and word recognition. *Psychophysiology, 41*(1), 60-74. doi: 10.1111/1469-8986.00120
- DeLong, K. A., Urbach, T. P., & Kutas, M. (2005). Probabilistic word pre-activation during language comprehension inferred from electrical brain activity.

[10.1038/nn1504]. *Nature Neuroscience*, 8(8), 1117-1121. doi:
http://www.nature.com/neuro/journal/v8/n8/supinfo/nn1504_S1.html

Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, 71(1), 44-56.

Diamond, A. (2002). Normal Development of Prefrontal Cortex from Birth to Young Adulthood: Cognitive Functions, Anatomy, and Biochemistry. In D. T. Stuss & R. T. Knight (Eds.), *Principles of frontal lobe function* (pp. 466-503). New York: Oxford University Press.

Ding, Q., Vaynman, S., Akhavan, M., Ying, Z., & Gomez-Pinilla, F. (2006). Insulin-like growth factor I interfaces with brain-derived neurotrophic factor-mediated synaptic plasticity to modulate aspects of exercise-induced cognitive function. *Neuroscience*, 140(3), 823-833.

Donchin, E. (1981). Presidential Address, 1980 - Surprise! ... Surprise? . *Psychophysiology*, 18(5), 493-513.

Donnelly, J. E., Greene, J. L., Gibson, C. A., Smith, B. K., Washburn, R. A., Sullivan, D. K., . . . Williams, S. L. (2009). Physical Activity Across the Curriculum (PAAC): A randomized controlled trial to promote physical activity and diminish overweight and obesity in elementary school children. *Preventive Medicine*, 49(4), 336-341. doi: 10.1016/j.ypmed.2009.07.022

Dustman, R. E., Emmerson, R., & Shearer, D. (1994). Physical activity, age, and cognitive-neuropsychological function. *Journal of Aging and Physical Activity*, 2, 143-181.

- Dwyer, T., Coonan, W. E., Leitch, D. R., Hetzel, B. S., & Baghurst, R. A. (1983). An investigation of the effects of daily physical activity on the health of primary school students in South Australia. *International Journal of Epidemiology*, *12*(3), 308-313.
- Elleberg, D., & St-Louis-Deschenes, M. (2010). The effect of acute physical exercise on cognitive function during development. *Psychology of Sport and Exercise*, *11*(2), 122-126. doi: 10.1016/j.psychsport.2009.09.006
- Emmerson, R. Y., Dustman, R. E., & Shearer, D. E. (1989). P3 latency and symbol digit performance correlations in aging. *Experimental Aging Research*, *15*(3), 151-159.
- Ericsson, I. (2008). Motor skills, attention and academic achievements. An intervention study in school years 1-3. *British Educational Research Journal*, *34*(3), 301-313. doi: 10.1080/01411920701609299
- Etnier, J. L., Nowell, P. M., Landers, D. M., & Sibley, B. A. (2006). A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Research Reviews*, *52*(1), 119-130. doi: 10.1016/j.brainresrev.2006.01.002
- Federmeier, K. D., & Laszlo, S. (2009). Chapter 1 Time for meaning: electrophysiology provides insights into the dynamics of representation and processing in semantic memory. In H. R. Brian (Ed.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. Volume 51, pp. 1-44): Academic Press.
- Fonseca, L. C., Tedrus, G. M. A. S., Chiodi, M. G., Cerqueira, J. N., & Tonelotto, J. M. F. (2006). Quantitative EEG in children with learning disabilities: analysis of band power. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, *64*, 376-381.

- Fredericks, C. R., Kokot, S. J., & Krog, S. (2006). Using a developmental movement programme to enhance academic skills in grade 1 learners. *South African Journal of Research in Sport, Physical Education and Recreation*, 28(1), 29-42.
- Friedrich, M., & Friederici, A. D. (2010). Maturing brain mechanisms and developing behavioral language skills. *Brain and Language*, 114(2), 66-71. doi: DOI: 10.1016/j.bandl.2009.07.004
- Fuchigami, T., Okubo, O., Ejiri, K., Fujita, Y., Kohira, R., Noguchi, Y., . . . Haradag, K. (1995). Developmental changes in P300 wave elicited during two different experimental conditions. *Pediatric Neurology*, 13(1), 25-28.
- Gabbard, C., & Barton, J. (1979). Effects of physical-activity on mathematical computation among young-children *Journal of Psychology*, 103(2), 287-288.
- Galotti, K. M. (2011). Introduction and overview *Cognitive development: infancy through adolescence* (pp. 1-16). Los Angeles: SAGE Publications.
- Hagen, G. F., Gatherwright, J. R., Lopez, M. A., & Polich, J. (2006). P3a from visual stimuli: Task difficulty effects. *International Journal of Psychophysiology*, 59, 8-14. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2005.08.003
- Hahne, A., Eckstein, K., & Friederici, A. D. (2004). Brain signatures of syntactic and semantic processes during children's language development. *J. Cognitive Neuroscience*, 16(7), 1302-1318. doi: 10.1162/0898929041920504
- Halgren, E., Squires, N., Wilson, C., Rohrbaugh, J., Babb, T., & Crandall, P. (1980). Endogenous potentials generated in the human hippocampal formation and

amygdala by infrequent events. *Science*, 210(4471), 803-805. doi:
10.1126/science.7434000

Helenius, P., Salmelin, R., Service, E., & Connolly, J. F. (1998). Distinct time courses of word and context comprehension in the left temporal cortex. *Brain*, 121, 1133-1142.

Hill, S. Y., Shen, S., Locke, J., Steinhauer, S. R., Konicky, C., Lowers, L., & Connolly, J. (1999). Developmental delay in P300 production in children at high risk for developing alcohol-related disorders. *Biological Psychiatry*, 46(7), 970-981.

Hillman, C. H., Buck, S. M., Themanson, J. R., Pontifex, M. B., & Castelli, D. M. (2009). Aerobic fitness and cognitive development: Event-related brain potential and task performance indices of executive control in preadolescent children. *Developmental Psychology*, 45(1), 114-129. doi: 10.1037/a0014437

Hillman, C. H., Castelli, D. M., & Buck, S. M. (2005). Aerobic fitness and neurocognitive function in healthy preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(11), 1967-1974. doi:
10.1249/01.mss.0000176680.79702.ce

Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., & Kramer, A. F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159(3), 1044-1054.

Hillman, C. H., Snook, E. M., & Jerome, G. J. (2003). Acute cardiovascular exercise and executive control function. *International Journal of Psychophysiology*, 48(3), 307-314. doi: 10.1016/s0167-8760(03)00080-1

- Hinkle, J. S., Tuckman, B. W., & Sampson, J. P. (1993). The psychology, physiology, and creativity of middle school aerobic exercisers. *Elementary School Guidance and Counseling, 28*(2), 133-145.
- Holcomb, P. J. (1988). Automatic and attentional processing: An event-related brain potential analysis of semantic priming. *Brain and Language, 35*(1), 66-85. doi: Doi: 10.1016/0093-934x(88)90101-0
- Holcomb, P. J., Coffey, S. A., & Neville, H. J. (1992). Visual and auditory sentence processing: A developmental analysis using event-related brain potentials. *Developmental Neuropsychology, 8*(2-3), 203-241.
- Holcomb, P. J., & Neville, H. J. (1990). Auditory and visual semantic priming in lexical decision: A comparison using event-related brain potentials. *Language and Cognitive Processes, 5*(4), 281 - 312.
- Howard, L., & Polich, J. (1985). P300 latency and memory span development. *Developmental Psychology, 21*(2), 283-289. doi: Doi: 10.1037/0012-1649.21.2.283
- 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), 153-184. doi: 10.1037/0033-295x.91.2.153
- Johnson, R. (1988). Scalp-recorded P300 activity in patients following unilateral temporal lobectomy. *Brain, 111*(6), 1517-1529. doi: 10.1093/brain/111.6.1517

- Johnson, R., & Donchin, E. (1982). Sequential expectancies and decision-making in a changing environment: An electrophysiological approach *Psychophysiology*, *19*(2), 183-200.
- Johnson, R., Pfefferbaum, A., & Kopell, B. S. (1985). P300 and long-term-memory: latency predicts recognition performance. *Psychophysiology*, *22*(5), 497-507. doi: 10.1111/j.1469-8986.1985.tb01639.x
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood-Cliffs: Prentice Hall.
- Kamijo, K., Pontifex, M. B., O'Leary, K. C., Scudder, M. R., Wu, C.-T., Castelli, D. M., & Hillman, C. H. (2011). The effects of an afterschool physical activity program on working memory in preadolescent children. *Developmental Science*, 1-13. doi: 10.1111/j.1467-7687.2011.01054.x
- Karrer, R., & Ackles, P. K. (1987). *Visual event-related potentials of infants during a modified oddball procedure*. Paper presented at the 8th International Conference on Event-Related Potentials of the Brain, Stanford University, California.
- Kiehl, K. A., Laurens, K. R., Duty, T. L., Forster, B. B., & Liddle, P. F. (2001). Neural sources involved in auditory target detection and novelty processing: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, *38*(01), 133-142. doi: doi:null
- Kihara, M., Hogan, A. M., Newton, C. R., Garrashi, H. H., Neville, B. R., & de Haan, M. (2010). Auditory and visual novelty processing in normally-developing Kenyan children. *Clinical Neurophysiology*, *121*(4), 564-576. doi: DOI: 10.1016/j.clinph.2009.11.086

- Kirino, E., Belger, A., Goldman-Rakic, P., & McCarthy, G. (2000). Prefrontal activation evoked by infrequent target and novel stimuli in a visual target detection task: an event-related functional magnetic resonance imaging study. *The Journal of Neuroscience*, *20*(17), 6612-6618.
- Knight, R. T., Scabini, D., Woods, D. L., & Clayworth, C. C. (1989). Contributions of temporal-parietal junction to the human auditory P3. *Brain Research*, *502*(1), 109-116. doi: Doi: 10.1016/0006-8993(89)90466-6
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(12), 463-470. doi: Doi: 10.1016/s1364-6613(00)01560-6
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, *62*(1), 621-647. doi: doi:10.1146/annurev.psych.093008.131123
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity *Science*, *207*(4427), 203-205.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, *197*, 792-795.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., Hannay, H. J., & Fischer, J. S. (2004). Basic concepts *Neuropsychological assessment* (4th ed., pp. 15-38). Oxford: Oxford University Press.

Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., Hannay, H. J., & Fisher, J. S. (Eds.). (2004). *Neuropsychological assessment* (4th ed.). New York: Oxford University Press.

Luck, S. J. (2005). An introduction to event-related potentials and their neural origins. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *An introduction to event-related potential technique* (pp. 1-50). Cambridge: MIT Press.

Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, *21*(2), 171-186. doi: 10.1111/j.1469-8986.1984.tb00201.x

Magnie, 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), 369-377.

Mahar, M. T., Murphy, S. K., Rowe, D. A., Golden, J., Shields, A. T., & Raedeke, T. D. (2006). Effects of a classroom-based program on physical activity and on-task behavior. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *38*(12), 2086-2094. doi: 10.1249/01.mss.0000235359.16685.a3

McCarthy, G., Nobre, A. C., Bentin, S., & Spencer, D. D. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: I. Intracranial distribution and neural generators. *Journal of Neuroscience*, *15*(2), 1080-1089.

McCarthy, G., Wood, C., Williamson, P., & Spencer, D. (1989). Task-dependent field potentials in human hippocampal formation. *The Journal of Neuroscience*, *9*(12), 4253-4268.

- McMorris, T. (2009). Exercise and cognitive function: a neuroendocrinological explanation. In T. McMorris, P. D. Tomporowski & M. Audiffren (Eds.), *Exercise and cognitive function* (pp. 41-68). Chichester: Wiley-Blackwell.
- McMorris, T., Collard, K., Corbett, J., Dicks, M., & Swain, J. P. (2008). A test of the catecholamines hypothesis for an acute exercise-cognition interaction. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, *89*(1), 106-115. doi: 10.1016/j.pbb.2007.11.007
- 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*(8), 667-676.
- McNaughten, D., & Gabbard, C. (1993). Physical exertion and immediate mental performance of 6th-grade children. *Perceptual and Motor Skills*, *77*(3), 1155-1159.
- McPherson, W. B., & Holcomb, P. J. (1999). An electrophysiological investigation of semantic priming with pictures of real objects. *Psychophysiology*, *36*(1), 53-65.
- Mecklinger, A., Maess, B., Opitz, B., Pfeifer, E., Cheyne, D., & Weinberg, H. (1998). A MEG analysis of the P300 in visual discrimination tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, *108*(1), 45-56. doi: Doi: 10.1016/s0168-5597(97)00092-0
- Meeusen, R., & Demeirleir, K. (1995). Exercise and brain neurotransmission. *Sports Medicine*, *20*(3), 160-188.

- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology, 41*(1), 49-100. doi: 10.1006/cogp.1999.0734
- Naglieri, J. A., & Kaufman, J. C. (2001). Understanding intelligence, giftedness and creativity using the pass theory. *Roeper Review, 23*(3), 151-156. doi: 10.1080/02783190109554087
- Niedermeyer, E. (2005). The normal EEG of the waking adult. In E. Niedermeyer & F. L. da Silva (Eds.), *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related field* (5 ed., pp. 167-192). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Nobre, A. C., & McCarthy, G. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: II. Effects of word type and semantic priming. *Journal of Neuroscience, 15*(2), 1090-1098.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology, 7*(1), 44-64. doi: 10.1016/0010-0285(75)90004-3
- Parasuraman, R., Warm, J. S., & See, J. E. (1998). Brain systems of vigilance. In R. Parasuraman (Ed.), *The attentive brain* (pp. 221-256). Cambridge: MIT Press.
- Pesce, C., Crova, C., Cereatti, L., Casella, R., & Bellucci, M. (2009). Physical activity and mental performance in preadolescents: Effects of acute exercise on free-recall memory. *Mental Health and Physical Activity, 2*, 16-22.

- Picton, T. W. (1992). The P300 wave of the human event-related potential. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 9(4), 456-479.
- Ploughman, M. (2008). Exercise is brain food: The effects of physical activity on cognitive function. *Developmental Neurorehabilitation*, 11(3), 236 - 240.
- Polich, J. (1987). Task difficulty, probability, and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 68(4), 311-320. doi: 10.1016/0168-5597(87)90052-9
- Polich, J. (2007). Updating p300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128-2148. doi: 10.1016/j.clinph.2007.04.019
- Polich, J., & Criado, J. R. (2006). Neuropsychology and neuropharmacology of P3a and P3b. *International Journal of Psychophysiology*, 60(2), 172-185. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2005.12.012
- Polich, J., Howard, L., & Starr, A. (1983). P300 latency correlates with digit span. *Psychophysiology*, 20(6), 665-669. doi: 10.1111/j.1469-8986.1983.tb00936.x
- Pollatschek, J. L., & O'Hagan, F. J. (1989). An investigation of the psycho-physical influences of a quality daily physical education programme. *Health Education Research*, 4(3), 341-350. doi: 10.1093/her/4.3.341
- Pontifex, M. B., Raine, L. B., Johnson, C. R., Chaddock, L., Voss, M. W., Cohen, N. J., . . . Hillman, C. H. (2011). Cardiorespiratory fitness and the flexible modulation of cognitive control in preadolescent children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(6), 1332-1345.

- Raviv, S., & Low, M. (1990). Influence of physical-activity on concentration among junior-high-school students. *Perceptual and Motor Skills*, *70*(1), 67-74.
- Reynolds, G. D., & Richards, J. E. (2005). Familiarization, attention, and recognition memory in infancy: An event-related potential and cortical source localization study. *Developmental Psychology*, *41*(4), 598-615. doi: 10.1037/0012-1649.41.4.598
- Sallis, J. F., McKenzie, T. L., Kolody, B., Lewis, M., Marshall, S., & Rosengard, P. (1999). Effects of health-related physical education on academic achievement: Project SPARK. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *70*(2), 127-134.
- Sanders, A. F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, *53*(1), 61-97. doi: 10.1016/0001-6918(83)90016-1
- Sarfarazi, M., Cave, B., Richardson, A., Behan, J., & Sedgwick, E. M. (1999). Visual event related potentials modulated by contextually relevant and irrelevant olfactory primes. *Chemical Senses*, *24*(2), 145-154.
- Sawaki, R., & Katayama, J. (2006). Severity of AD/HD symptoms and efficiency of attentional resource allocation. *Neuroscience Letters*, *407*(1), 86-90. doi: 10.1016/j.neulet.2006.08.006
- Sawaki, R., & Katayama, J. (2007). Difficulty of discrimination modulates attentional capture for deviant information. *Psychophysiology*, *44*(3), 374-382. doi: 10.1111/j.1469-8986.2007.00506.x
- Schneider, S., Vogt, T., Frysch, J., Guardiera, P., & Struder, H. K. (2009). School sport-A neurophysiological approach. *Neuroscience Letters*, *467*(2), 131-134. doi: 10.1016/j.neulet.2009.10.022

- Shephard, R. J., Lavallée, H., Volle, M., LaBarre, R., & Beaucage, C. (1994). Academic skills and required physical education: The Trois Rivières experience *CAHPER Journal Research Supplement 1*(1), 1-12.
- Sibley, B. A., & Etnier, J. L. (2003). The relationship between physical activity and cognition in children: A meta-analysis. *Pediatric Exercise Science, 15*(3), 243-256.
- Squires, K., Wickens, C., Squires, N., & Donchin, E. (1976). The effect of stimulus sequence on the waveform of the cortical event-related potential. *Science, 193*(4258), 1142-1146. doi: 10.1126/science.959831
- Squires, N. K., Squires, K. C., & Hillyard, S. A. (1975). Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 38*(4), 387-401. doi: 10.1016/0013-4694(75)90263-1
- St Clair-Thompson, H. L., & Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 59*(4), 745-759. doi: 10.1080/17470210500162854
- Stige, S., Fjell, A. M., Smith, L., Lindgren, M., & Walhovd, K. B. (2007). The development of visual P3a and P3b. *Developmental Neuropsychology, 32*(1), 563-584.
- Stroth, S., Kubesch, S., Dieterle, K., Ruchsow, M., Heim, R., & Kiefer, M. (2009). Physical fitness, but not acute exercise modulates event-related potential indices for executive control in healthy adolescents. *Brain Research, 1269*, 114-124. doi: 10.1016/j.brainres.2009.02.073

- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, *150*(3700), 1187-1188. doi: 10.1126/science.150.3700.1187
- Tanaka, K., de Quadros, A. C., Santo, R. F., Stella, F., Gobbi, L. T. B., & Gobbi, S. (2009). Benefits of physical exercise on executive functions in older people with Parkinson's disease. *Brain and Cognition*, *69*(2), 435-441. doi: 10.1016/j.bandc.2008.09.008
- Tomporowski, P. D. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychologica*, *112*(3), 297-324. doi: 10.1016/s0001-6918(02)00134-8
- Tomporowski, P. D., Davis, C. L., Lambourne, K., Gregoski, M., & Tkacz, J. (2008). Task switching in overweight children: Effects of acute exercise and age. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *30*(5), 497-511.
- Tomporowski, P. D., Davis, C. L., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2008). Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Educational Psychology Review*, *20*(2), 111-131. doi: 10.1007/s10648-007-9057-0
- Tse, C.-Y., Lee, C.-L., Jason, S., Garnsey, S. M., Dell, G. S., Fabiani, M., & Gratton, G. (2007). Imaging cortical dynamics of language processing with the event-related optical signal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(43), 17157-17162.
- Tuckman, B. W., & Hinkle, J. S. (1986). An experimental study of the physical and psychological effects of aerobic exercise on schoolchildren. *Health Psychology*, *5*(3), 197-207.

- Uhrich, T. A., & Swalm, R. L. (2007). A pilot study of a possible effect from a motor task on reading performance. *Perceptual and Motor Skills, 104*(3), 1035-1041.
- Van der Stelt, O. (1999). Visual P3 as a potential vulnerability marker of alcoholism: evidence from the Amsterdam Study of Children of Alcoholics. *Alcohol and Alcoholism, 34*(3), 267-282.
- Van Petten, C., & Luka, B. J. (2006). Neural localization of semantic context effects in electromagnetic and hemodynamic studies. *Brain and Language, 97*(3), 279-293. doi: DOI: 10.1016/j.bandl.2005.11.003
- van Petten, C., & Rheinfelder, H. (1995). Conceptual relationships between spoken words and environmental sounds: Event-related brain potential measures. *Neuropsychologia, 33*(4), 485-508. doi: Doi: 10.1016/0028-3932(94)00133-a
- van Praag, H. (2009). Exercise and the brain: something to chew on. *Trends in Neurosciences, 32*(5), 283-290. doi: 10.1016/j.tins.2008.12.007
- van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J., & Gage, F. H. (1999). Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 96*(23), 13427-13431.
- vanBoxtel, M. P. J., Langerak, K., Houx, P. J., & Jolles, J. (1996). Self-reported physical activity, subjective health, and cognitive performance in older adults. *Experimental Aging Research, 22*(4), 363-379.
- Vaynman, S., Ying, Z., & Gomez-Pinilla, F. (2004). Hippocampal BDNF mediates the efficacy of exercise on synaptic plasticity and cognition. *European*

Journal of Neuroscience, 20(10), 2580-2590. doi: 10.1111/j.1460-9568.2004.03720.x

Verleger, R., Heide, W., Butt, C., & Kömpf, D. (1994). Reduction of P3b in patients with temporo-parietal lesions. *Cognitive Brain Research*, 2(2), 103-116. doi: Doi: 10.1016/0926-6410(94)90007-8

Wetzel, N., & Schröger, E. (2007). Modulation of involuntary attention by the duration of novel and pitch deviant sounds in children and adolescents. *Biological Psychology*, 75(1), 24-31. doi: DOI: 10.1016/j.biopsycho.2006.10.006

Wu, C. T., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Chaddock, L., Voss, M. W., Kramer, A. F., & Hillman, C. H. (2011). Aerobic fitness and response variability in preadolescent children performing a cognitive control task. *Neuropsychology*, 25(3), 333-341. doi: 10.1037/a0022167

Zervas, Y., Danis, A., & Klissouras, V. (1991). Influence of physical exertion on mental performance with reference to training. *Perceptual and Motor Skills*, 72(3), 1215-1221.