

Université de Montréal

**Effets d'un entraînement neuromoteur et d'un
entraînement aérobie sur les fonctions exécutives chez
l'enfant**

par

Marie-Claude Ménard

Département de kinésiologie

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maîtrise (M.Sc.) en Sciences de l'activité physique

Août 2009

© Marie-Claude Ménard, 2009

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Effets d'un entraînement neuromoteur et d'un entraînement aérobie sur les fonctions
exécutives chez l'enfant

présentée par :

Marie-Claude Ménard

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Wayne Halliwell, président-rapporteur
Dave Elleberg, directeur de recherche
Annie Bernier, examinatrice externe

RÉSUMÉ

Les études des effets de l'activité physique sur la cognition humaine et animale ne permettent pas de clarifier si ces effets sont spécifiques au type d'exercice pratiqué et si les gains cognitifs pour un cerveau en développement sont globaux ou exclusifs à certaines fonctions cognitives. Considérant le circuit nerveux entre le cervelet et le cortex préfrontal dorsolatéral, nous croyons qu'un entraînement neuromoteur stimulant les fonctions motrices du cervelet améliorera les fonctions exécutives associées au cortex préfrontal. Comme l'entraînement aérobie a affecté positivement différentes fonctions cognitives dans des études précédentes, nous croyons que ce type d'exercice améliorera les fonctions exécutives et la mémoire à long-terme. Trois classes de sixième année (âge moyen = 11,4 ans) ont été aléatoirement assignées aux groupes neuromoteur (n=22), aérobie (n=19) et contrôle (n=15). Nous nous sommes assurés que l'entraînement neuromoteur ne stimulait aucunement la capacité aérobie et que l'entraînement aérobie n'améliorait aucune habileté motrice. Les entraînements pour les deux groupes expérimentaux consistaient en 30 minutes d'activités par jour d'école pendant les heures de classe, pour 10 semaines ; le groupe contrôle suivait le programme scolaire régulier. Des tests moteurs et cognitifs ont été administrés avant et après l'intervention. Une série d'ANOVAs a révélé que l'entraînement neuromoteur avait amélioré la fluence verbale avec un effet marginal sur la génération de verbe, deux fonctions exécutives associées au circuit fronto-cérébelleux, et que l'entraînement aérobie avait mené à une amélioration distincte de la fluence verbale. Ainsi, nos résultats démontrent que les améliorations des fonctions exécutives sont spécifiques à chaque entraînement pratiqué.

Mots-clés : exercice – cognition – enfant – fonctions exécutives – cervelet – cortex préfrontal – qualités motrices – entraînement aérobie

ABSTRACT

Studies investigating effects of exercise on cognition in animals and human do not permit to clarify if these effects are specific to the type of exercise and if the cognitive gains for a developing brain are global or exclusive to certain cognitive functions. Considering the neuronal circuit between the cerebellum and the dorsolateral prefrontal cortex, we hypothesized that neuromotor training will improve executive functions associated with prefrontal cortex. Since aerobic training positively affected different cognitive functions in previous studies, we hypothesize that this type of exercise will improve executive functions and long-term memory. Three sixth grade classes (mean age = 11.4 years) were randomly assigned to neuromotor (n=20), aerobic (n=19), and control (n=15) conditions. We ensured that the motor training did not stimulate aerobic capacity and that the aerobic intervention was devoid of a motor training component. The exercise sessions for the two training groups consisted in 30 minutes per school day, took place during class time, and lasted for 10 weeks; the control group followed the regular school program. Motor and cognitive tests were administered before and after the intervention. A series of ANOVA's revealed that neuromotor training enhanced verbal fluency with a marginal effect on verb generation, executive functions related to the fronto-cerebellar circuit, and that aerobic training led to a marginal improvement for verbal fluency. Therefore, our results showed differential improvements in executive functions induced by both neuromotor and aerobic training.

Keywords: exercise – cognition – child – executive functions – cerebellum – prefrontal cortex – motor ability – aerobic training

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vii
REMERCIEMENTS	ix
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 – RECENSION DES ÉCRITS	4
2.1 – EXERCICE ET COGNITION : MODÈLE ANIMAL.....	4
2.1.1 – ENVIRONNEMENT ENRICHIS ET FONCTIONS COGNITIVES	4
2.1.2 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE ET FONCTIONS COGNITIVES	6
2.1.3 – ENTRAÎNEMENT ET ADAPTATIONS NEUROANATOMIQUES	6
2.1.4 – MODÈLE ANIMAL ET COGNITION HUMAINE.....	8
2.2 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE ET COGNITION : HUMAIN	9
2.2.1 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE : PERSONNE ÂGÉE.....	11
2.2.2 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE : ADULTE	13
2.2.3 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE : ENFANT	15
2.3 – ENTRAÎNEMENT NEUROMOTEUR ET COGNITION : HUMAIN.....	17
2.3.1 – ENTRAÎNEMENT PERCEPTIVO-MOTEUR	18
2.3.2 – ENTRAÎNEMENT DE YOGA.....	20
2.4 – CIRCUIT NEUROLOGIQUE	21
2.4.1 – CERVELET	21
2.4.2 – CORTEX PRÉFRONTAL DORSOLATÉRAL.....	25
2.4.3 – CIRCUIT FRONTO-CÉRÉBELLEUX.....	27
CHAPITRE 3 – OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	30

3.1 – OBJECTIFS	30
3.2 – HYPOTHÈSES	30
CHAPITRE 4 – MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	32
4.1 – PARTICIPANTS	32
4.2 – DÉROULEMENT	33
4.3 – ENTRAÎNEMENTS AÉROBIE ET NEUROMOTEUR	34
4.4 – ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ AÉROBIE MAXIMALE ET DES HABILITÉS MOTRICES ...	35
4.5 – ÉVALUATION DES FONCTIONS COGNITIVES	39
4.6 – ANALYSES STATISTIQUES	41
CHAPITRE 5 – RÉSULTATS.....	42
CHAPITRE 6 – DISCUSSION	64
6.1 – LIMITES	64
6.2 – EFFETS DE L’ENTRAÎNEMENT NEUROMOTEUR	65
6.3 – EFFETS DE L’ENTRAÎNEMENT AÉROBIE	70
CONCLUSION.....	72
BIBLIOGRAPHIE	74
Annexe 1 – Questionnaire de développement.....	85
Annexe 2 – Formulaire d’information et de consentement pour les participants enfants et leurs parents.....	88
Annexe 3 – Description vulgarisée du projet.....	95
Annexe 4 – Avis favorable du Comité Scientifique du Département de Kinésiologie .	96
Annexe 5 – Certificat d’éthique du Comité d’éthique de la recherche des sciences de la santé.....	97
Annexe 6– Échelle de perception de l’effort pour les enfants	99
Annexe 7– Autorisation des coauteurs de l’article.....	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Périodes de perfectionnement des habiletés motrices	2
Tableau 2 – Participants	32

ARTICLE

<i>Table 1 – Participants</i>	58
<i>Table 2 – Intellectual Quotient</i>	58
<i>Table 3 – Aerobic Capacity and Motor Abilities</i>	59
<i>Table 4 – Cognitive Abilities</i>	60
<i>Table 5 – Correlation - Aerobic Group</i>	63
<i>Table 6 – Correlations - Neuromotor Group</i>	63

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Le cervelet (Marstzloff, 2009).....	22
Figure 2 – Le cervelet et ses connections avec les régions cortex (Netter, 2002).....	23
Figure 3 – A- Déplacement simple des tiges ; B- Déplacement avec résolution de problème (Kim, Uğurbil, & Strick, 1994).....	24
Figure 4 – Cortex préfrontal (Ridderinkhof, van den Wildenberg, Segalowitz, & Carter, 2004).....	26
Figure 5 – Position à respecter pour le test d'équilibre Flamingo.....	35
Figure 6 – Test de sauts en zigzag.....	36
Figure 7 – Test de Frappe.....	37
Figure 8 – <i>Grooved Pegboard</i>	37
Figure 9 – Exemple de matrice du NNAT.....	38

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AE : groupe d'entraînement aérobie

ANOVA : analyse de la variance

BA : *Brodman Area*

CAS : *Cognitive Assessment System*

CT : groupe contrôle

QI : quotient intellectuel

M.C.M. : Marie-Claude Ménard

NM : groupe d'entraînement neuromoteur

NNAT : Test d'aptitude non-verbale de Naglieri

*À tous nos enfants qui méritent que le monde
s'ouvre à eux pour leur offrir un avenir prospère.*

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon directeur de recherche qui m'a guidée vers les divers défis à relever pour réussir cette maîtrise. Mon entourage mérite une mention toute spéciale pour m'avoir aidée à me surpasser dans les hauts et les bas d'une apprentie chercheuse. Ma famille a été mon pilier, mes amis m'ont divertie et supportée, et mes collègues sont devenus des amis très chers. Un petit clin d'œil à mon ange-gardien de grand-père qui sait toujours être là au bon moment.

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

Depuis plusieurs années déjà, la pratique d'activité physique est associée non seulement à des bénéfices physiques et psychosociaux, mais à des effets positifs sur la cognition. Plusieurs études ont été conduites chez l'aîné, grâce auxquelles un lien positif a été établi entre l'entraînement¹ aérobic et les fonctions cognitives (Charles H. Hillman, Erickson, & Kramer, 2008). Chez l'enfant, des gains cognitifs conséquents à la pratique d'activité physique ont aussi été observés (Tomprowski, Davis, Miller, & Naglieri, 2008). Par contre, deux lacunes importantes quant aux effets de l'activité physique sur la cognition sont toujours présentes dans la littérature. D'abord, le type d'exercice pratiqué est une variable qui est peu contrôlée et qui varie de façon importante d'une étude à l'autre. Comme l'entraînement suscite des adaptations physiologiques spécifiques, il est important d'identifier les stimulations physiques qui constituent les sources des effets cognitifs. Conséquemment, dans la littérature, un débat est toujours présent concernant les effets d'un entraînement neuromoteur² sur la cognition, comparativement aux effets observés suite à un entraînement aérobic. Ensuite, des effets de l'activité physique sur différentes fonctions cognitives ont été observés dans plusieurs études. Cependant, les protocoles de recherche n'ont pas permis de discerner si les gains cognitifs suite à une pratique d'activité physique pour un cerveau en développement sont globaux ou spécifiques à certaines fonctions cognitives.

Diamond (2000) a proposé que le développement moteur et le développement cognitif étaient reliés grâce à un circuit neurologique entre le cervelet et le cortex préfrontal dorsolatéral. Ainsi, ce modèle nous amène à suggérer que l'impact sur les fonctions cognitives d'un entraînement physique chez l'enfant pourrait venir de ce lien caractéristique lors du développement. Conséquemment, si le système moteur est stimulé lors de la période de développement ceci pourrait avoir un effet plus grand sur les fonctions

¹ Le terme «entraînement» utilisé tout au long de ce mémoire réfère à une pratique raisonnée d'activités, avec un but précis d'accroître des qualités physiques ou cognitives précises.

² Le terme «neuromoteur» utilisé tout au long de ce mémoire décrit une implication conjointe du système nerveux central et du système musculaire.

exécutives comparativement à une même stimulation chez l'adulte. Les qualités motrices se développent en mode accéléré plus spécifiquement chez les filles de 8 à 11 ans et les garçons de 9 à 12 ans. Il s'agit d'une période de développement facilité entre autres pour la vitesse, la coordination et le contrôle de la motricité (Beunen & Malina, 1988; Viru et al., 1998). Le Tableau 1 présente les phases de développement facilité pour certaines habiletés (Weineck, 1997).

Tableau 1 – Périodes de perfectionnement des habiletés motrices

Capacités coordinatives	Âges (années)											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Coordination sous contrainte temporelle	■	■	■									Garçons
Différenciation kinesthésique spatiale et temporelle	■	■			■	■						
Réaction acoustique et optique			■	■	■							
Rythme				■	■							
Orientation spatiale							■	■	■			
Équilibre					■	■						
Coordination sous contrainte temporelle	■	■	■									Filles
Différenciation kinesthésique spatiale et temporelle	■	■			■	■						
Réaction acoustique et optique			■	■	■							
Rythme		■	■	■								
Orientation spatiale							■	■	■			
Équilibre				■	■							

Ainsi, le présent projet vise à vérifier les effets de deux types d'exercice sur les fonctions cognitives chez l'enfant : un entraînement neuromoteur sans stimulation aérobie et cognitive et un entraînement aérobie sans stimulation motrice et cognitive. Ceci

permettra d'isoler les qualités physiques entraînées et les adaptations physiques subséquentes aux activités pratiquées pour vérifier les causes possibles des changements cognitifs. De plus, les fonctions cognitives mesurées permettront de vérifier si les effets sont globaux ou spécifiques, grâce à des tests de fonctions exécutives et de mémoire à long-terme.

Dans ce mémoire, vous trouverez en premier lieu une description des connaissances à ce jour des effets d'entraînement sur la cognition, ainsi qu'une présentation d'un modèle neurologique proposant les mécanismes possibles des changements observés. Par la suite, la méthodologie du projet sera décrite et un article scientifique écrit en anglais sera introduit pour décrire les résultats obtenus. Finalement, une discussion des résultats et une conclusion complèteront le corps de ce document.

CHAPITRE 2 – RECENSION DES ÉCRITS

Le débat visant à distinguer les effets d'un entraînement neuromoteur et d'un entraînement aérobie sur la cognition est toujours présent. Une raison majeure qui explique la persistance de ce questionnement est le manque d'études comparant directement différents types d'activité physique chez l'humain. De plus, la disparité entre les protocoles de recherche portant sur ce même sujet laisse place à plusieurs interprétations possibles des différents résultats observés. Une autre raison est le manque de soutien théorique, qui rend l'interprétation des observations difficiles. Les mécanismes neurologiques qui sous-tendent les changements neuropsychologiques observés sont très peu discutés dans les études. Ainsi, l'intérêt principal de la présente section est de recenser les études ayant traité de l'effet d'un entraînement physique sur la cognition ou sur le cerveau, et d'utiliser ces connaissances pour élaborer un protocole de recherche aidant à clarifier la contribution de l'activité physique sur la cognition chez l'enfant. Conjointement à ces études expérimentales sur l'entraînement, des études traitant des liens anatomiques et physiologiques des fonctions cognitives ont été recensées pour proposer un cadre théorique aux changements observés sur la cognition suite à la pratique d'activité physique.

2.1 – EXERCICE ET COGNITION : MODÈLE ANIMAL

2.1.1 – ENVIRONNEMENT ENRICHIS ET FONCTIONS COGNITIVES

Plusieurs études ont évalué les effets de différents types d'exercice sur le cerveau de l'animal, plus spécifiquement chez les rongeurs. Une stimulation par un environnement enrichi chez le rat pourrait permettre un entraînement neuromoteur. Il s'agit de mettre l'animal dans une cage agrémentée d'obstacles, de boîtes de diverses formes, de cordages, de petites constructions, de jeux de plastiques, etc. En évoluant dans cet environnement, les animaux développent des qualités motrices comme la coordination, l'équilibre et l'agilité,

comparativement à des animaux vivant dans des cages normales avec ou sans roue comme seul objet ajouté (Gornicka-Pawlak, Jabłońska, Chyliński, & Domańska-Janik, 2009). Dans d'autres cas, les animaux sont encouragés à traverser un parcours à obstacles, constitué des mêmes éléments que l'environnement enrichi. Leggio et al. (2005) ont étudié les effets d'une exposition à un environnement enrichi pendant dix à douze semaines sur la performance à deux tâches de mémoire contextuelle et spatiale chez le rat. Cette habileté cognitive chez l'animal nécessite l'intégration et la mémorisation d'informations visuelles pour se familiariser avec l'environnement et s'y déplacer rapidement et efficacement. La première tâche effectuée a été l'*Eight-arm Radial Maze*. Il s'agit d'une tâche pour laquelle l'animal est placé sur un plateau rond relié à huit plateformes et il doit s'y déplacer pour accéder à de la nourriture présente sur certaines d'entre elles. Si l'animal possède une bonne mémoire contextuelle et spatiale, il utilisera les indices visuels de l'environnement et ne visitera qu'une seule fois chaque plateforme pour trouver rapidement la nourriture. La deuxième tâche était le *Morris Water Maze*. Dans celle-ci, l'animal est placé dans un petit bassin d'eau opaque contenant une plateforme dissimulée sous l'eau et il doit la trouver. L'animal qui trouve rapidement la plateforme sans nager une longue distance présente une bonne mémoire contextuelle. Ensuite, un rappel est fait en redéposant l'animal dans le bassin sans plateforme. Un animal avec une bonne mémoire contextuelle reste dans le cadran où se trouvait la plateforme lors du premier essai. Dans cette étude, les chercheurs ont observé une performance supérieure aux deux tâches pour le groupe exposé à l'environnement enrichi comparativement aux rats exposés à un environnement normal. Ils ont donc suggéré une amélioration des habiletés de mémoire visuo-spatiale et de stratégies de localisation conséquente à l'exposition à l'environnement enrichi.

Harburger, Lambert et Frick (2007) ont utilisé le même genre de protocole pour vérifier les effets d'un environnement enrichi en lien avec l'âge de l'animal. Ils ont étudié les effets d'une exposition de 24 heures par jour pour 6 semaines à un environnement enrichi chez des animaux jeunes (3 mois), matures (15 mois) et âgés (21 mois), comparativement à des animaux de même âge sans stimulation autre que l'eau et la nourriture dans la cage. Suite à l'intervention, les chercheurs ont constaté une amélioration

de la performance au *Morris Water Maze* chez les mâles âgés. Ainsi, l'exposition à l'environnement enrichi dans cette étude n'était seulement bénéfique qu'aux animaux âgés.

2.1.2 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE ET FONCTIONS COGNITIVES

Quoique ces résultats suggèrent une amélioration cognitive suite à un entraînement neuromoteur correspondant à l'exposition à un environnement enrichi, des observations semblables ont été faites suite à un entraînement aérobie. Chez l'animal, les différents protocoles d'entraînement aérobie incluent de la course sur tapis roulant ou sur piste, ou de la course volontaire avec une roue indexée à la cage. Anderson et al. (2000) ont étudié l'effet de sept semaines d'entraînement de course volontaire sur la performance à l'*Eight-arm Radial Maze* chez le rat. Ils ont observé que les rats entraînés ont eu besoin de 30% moins d'essais que le groupe contrôle pour réussir la tâche. Van Praag, Shubert, Zhao et Gage (2005) ont utilisé le même genre de protocole pour vérifier les effets de l'entraînement en lien avec l'âge de la souris. Utilisant le *Morris Water Maze*, ils ont observé que les animaux âgés entraînés retrouvaient la plateforme plus rapidement que les animaux sédentaires. De plus, ils ont observé lors du rappel que les animaux entraînés restaient dans le cadran où la plate-forme se trouvait précédemment, quelque soit leur âge. Ils ont donc conclu que les rats entraînés développent une capacité de mémoire contextuelle plus élevée que les rats sédentaires.

2.1.3 – ENTRAÎNEMENT ET ADAPTATIONS NEUROANATOMIQUES

Les résultats à ces études suggèrent donc que les différents types d'entraînement, que ce soit moteur ou aérobie, mènent à des améliorations cognitives équivalentes chez l'animal. Les mesures d'habiletés cognitives employées dans ces études ont toutes été les mêmes, c'est-à-dire le *Morris Water Maze* et l'*Eight-Arm Radial Maze*. Chez le rongeur, malgré que les mesures neuropsychologiques ne soient pas aussi abondantes que chez l'humain, d'autres mesures auraient pu être utilisées sollicitant des habiletés cognitives

différentes, dont certaines fonctions frontales ou dites exécutives. Ceci pourrait donc constituer une limite aux conclusions sur les effets de l'entraînement sur la cognition de l'animal. Une autre limite de ces études est que l'environnement enrichi sollicite également les habiletés visuo-spatiales. Cette stimulation aurait pu être la source des améliorations cognitives notées suite à l'entraînement pour les tâches de mémoire visuo-spatiale plus que la stimulation motrice seule. Ceci étant dit, d'autres études ont vérifié les adaptations neuroanatomiques dans le cerveau spécifiques à différents types d'activité, permettant d'observer des changements possiblement spécifiques aux entraînements faits.

Van Praag, Kempermann et Gage (1999) ont aussi reproduit ce genre de protocole, mais ils ont vérifié les effets de plusieurs interventions dans l'hippocampe du cerveau de la souris. Ils ont inclus un groupe exposé à un environnement enrichi, un groupe participant à un entraînement du *Morris Water Maze*, un groupe pratiquant de la nage, un groupe ayant accès à une roue 24 heures sur 24 et un groupe contrôle sans stimulation. Ils ont observé des changements significatifs seulement dans le gyrus denté, une structure de l'hippocampe, et ce, seulement pour deux groupes : celui ayant évolué dans un environnement enrichi et celui ayant couru volontairement. Il s'agissait d'une augmentation de la prolifération, de la survie et de la différenciation cellulaire pour l'entraînement aérobique volontaire, et seulement d'une augmentation de la survie et de la différenciation cellulaire suite à l'exposition à l'environnement enrichi. Les chercheurs ont suggéré que l'entraînement aérobique stimulait la synaptogénèse dans l'hippocampe, tandis que l'environnement enrichi y stimulait la survie cellulaire. Ces résultats supportent les observations faites dans les études présentées précédemment qui ont utilisé le *Morris Water Maze* et l'*Eight-Arm Radial Maze* pour mesurer les effets des entraînements neuromoteur et aérobique. Les adaptations neuroanatomiques comparables notées dans l'hippocampe suite aux entraînements différents auraient pu être la source des améliorations aux tests cognitifs, car cette structure est impliquée dans la mémoire contextuelle (Conrad & Roy, 1993).

Black, Isaacs, Anderson, Alcantara et Greenough (1990) ont comparé les deux types d'entraînement sur 30 jours de pratique, avec des conditions différentes : les rats dans la condition environnement enrichi complétaient un parcours à obstacles progressant en

volume et en difficulté, les rats de la condition aérobie forcée faisaient de la marche rapide sur tapis roulant en progressant vers un volume d'une heure, les rats dans la condition aérobie volontaire avaient accès à une roue 24 heures par jour, et les rats du groupe contrôle vivaient dans une cage normale sans stimulation autre que l'eau et la nourriture. Suite à l'entraînement, les rats de la condition environnement enrichi ont démontré une augmentation de la synaptogénèse dans le cervelet comparativement au groupe contrôle et aux deux autres groupes entraînés. De plus, les deux groupes participant à l'entraînement aérobie ont augmenté la densité des capillaires dans le cervelet, sans démontrer de synaptogénèse. Ces résultats ont été supportés par d'autres études qui ont répliqué ce protocole et ont observé les mêmes phénomènes post-exercice dans le cervelet (Anderson et al., 1994; Isaacs, Anderson, Alcantara, Black, & Greenough, 1992; Jeffrey A. Kleim et al., 2007; J. A. Kleim et al., 1998). Ainsi, ces études sur le cervelet supportent l'hypothèse que les différents entraînements mènent à des effets différents.

Les études conduites chez l'animal tendent à démontrer que les changements neuroanatomiques dans le cerveau sont conséquents et spécifiques à l'entraînement fait, sans toutefois permettre de clarifier les effets cognitifs. Ceci est dû à l'utilisation des mêmes mesures dans les études qui ont observé les mêmes effets cognitifs suite aux deux entraînements. De plus, les études spécifiques à l'hippocampe et au cervelet ne peuvent être comparées aux études évaluant les fonctions cognitives pour clarifier les effets d'un entraînement spécifique, car la durée des protocoles est différente. Les études vérifiant les changements cognitifs ont été de 6 à 12 semaines, alors que les études évaluant les adaptations neuroanatomiques dans le cerveau ont duré de 10 à 30 jours.

2.1.4 – MODÈLE ANIMAL ET COGNITION HUMAINE

Comme le modèle animal suppose un transfert des observations chez l'humain, les adaptations neuroanatomiques suite aux entraînements conduits présentent une limite. Une amélioration de la capacité aérobie maximale a été observée chez l'animal suite à un entraînement aérobie (Yano, Yano, Kinoshita, & Tsuji, 1997). Ceci nous permet donc

d'utiliser cette variable de comparaison avec l'humain et de s'attendre à des effets comparables suite à l'entraînement aérobic. Par contre, en ce qui a trait à l'environnement enrichi, l'amélioration des qualités motrices n'a jamais été mesurée directement chez l'animal. De plus, divers effets sur différents paramètres comportementaux ont été recensés dans la littérature. Les animaux évoluant dans un environnement enrichi ont démontré une plus grande interaction avec de nouveaux objets, une plus grande capacité d'habituation et une peur diminuée face aux nouveaux milieux rencontrés lors des tâches de mémoire contextuelle (Rose, Love, & Dell, 1986; H. Van de Weerd et al., 2002; H. A. Van de Weerd, Van Loo, Van Zutphen, Koolhaas, & Baumans, 1997). Ainsi, ces effets pourraient être la source des changements observés après l'entraînement. Ceci nous amène donc à vouloir cibler les habiletés motrices stimulées par l'entraînement neuromoteur chez l'humain et à les mesurer, pour bien identifier la source possible des effets observés.

2.2 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE ET COGNITION : HUMAIN

Chez l'humain, des liens positifs ont été observés entre la condition physique, plus spécifiquement la capacité aérobic maximale, et les performances cognitives. Buck, Hillman et Castelli (2008) ont corrélié la condition physique d'enfants, mesurée avec le *FITNESSGRAM*, avec leur performance à la tâche de Stroop, une tâche mesurant la flexibilité mentale, la résistance à l'interférence et le contrôle cognitif. Une plus grande capacité aérobic maximale était associée avec une meilleure performance au test de Stroop. Ce même groupe de chercheurs a utilisé l'électroencéphalographie et les potentiels évoqués pour mesurer les effets possibles de l'activité physique sur le cerveau (C.H. Hillman, Buck, Themanson, Pontifex, & Castelli, 2009). Cette technique a permis de mesurer l'activité électrique du cerveau lors de l'*Eriksen Flanker task*, une tâche exécutive sollicitant particulièrement la résistance à l'interférence. Les résultats indiquaient que les enfants avec une meilleure condition physique démontraient un plus grand nombre de bonnes réponses que les enfants avec un moins bon niveau de condition physique. De plus, les potentiels évoqués mesurés ont différencié entre les deux groupes. La P3, une onde associée à l'allocation

de ressources attentionnelles et à la vitesse de traitement cognitif, démontrait une plus grande allocation de ressources attentionnelles chez les enfants avec une meilleure condition physique.

Ces études suggèrent un lien positif entre une bonne condition physique et certaines habiletés cognitives. Par contre, nous ne pouvons affirmer que l'entraînement ou la pratique d'une activité sont la source des effets observés puisque seules les performances aux tests physiques et cognitifs ont été mesurées et corrélées entre elles. La limite principale à ces conclusions vient des sources influençant la consommation maximale d'oxygène, autres que la pratique d'activité physique. Bouchard et al. (1998) ont observé que l'hérédité et l'environnement familial affectaient la capacité aérobie maximale, ajustée d'après l'âge, le sexe et la masse corporelle, pour environ 50% de la variance résiduelle. De plus, ils ont évalué l'influence maternelle, probablement l'héritage mitochondrial, à 30% de l'influence familiale. La passation seule d'un test physique ne tient pas compte de ces éléments et, sans contrôle de la pratique d'activité physique, les conclusions reliant la pratique d'activité physique aux performances cognitives demeurent hypothétiques. Pour cette raison, la présente étude vise à isoler l'effet de la pratique d'activité physique sur les fonctions cognitives.

Plusieurs études portant sur les effets de l'activité physique sur le cerveau ont été faites chez l'enfant. Par contre, les activités pratiquées incluaient plusieurs stimulations, comme le système aérobie, les qualités musculaires et motrices et les habiletés académiques, cognitives et psychosociales. Certaines études incluaient aussi des séances informatives sur les habitudes de vie saines, la motivation et l'estime de soi. Les outils utilisés pour vérifier les effets de l'activité physique étaient également très variées et correspondaient à des tests de quotient intellectuel ou de fonctions cognitives spécifiques et des mesures de performance académique (Bailey, 2006; Budde, Voelcker-Rehage, Pietraßyk-Kendziorra, Ribeiro, & Tidow, 2008; Jurg, Kremers, Candel, Van Der Wal, & De Meij, 2006; Reynolds, Nicolson, & Hambly, 2003; Sallis et al., 1999; Shephard, 1996; Taras, 2005). Tomporowski, Davis, Miller et Naglieri (2008) ont effectué une revue de la littérature portant sur les effets de l'entraînement sur l'intelligence, la cognition et la

performance académique chez les enfants. Ils ont conclu que l'exercice favorisait spécifiquement les fonctions exécutives chez l'enfant, c'est-à-dire les fonctions cognitives de haut niveau (voir section 2.4.2 pour une description plus complète). Par contre, les études recensées présentaient beaucoup de divergences, résultant à des effets nuls à très significatifs sur la cognition. Ainsi, ces auteurs soutiennent qu'un manque de contrôle sur le type d'activité pratiquée, la durée et le volume des programmes et l'intensité de l'entraînement, correspondant au degré de sollicitation de la capacité maximale exigé, rend difficile la conclusion d'un effet spécifique de l'entraînement sur la cognition. Ces divergences dans les différents protocoles font en sorte que de nombreux facteurs peuvent être la source des effets observés. Ainsi, pour l'élaboration de notre protocole de recherche, nous avons considéré les études qui ont conduit un entraînement strictement aérobie et qui en ont évalué les effets sur diverses fonctions cognitives. Comme une seule étude de ce genre a été faite chez l'enfant, nous avons inclus des études semblables conduites chez les personnes âgées et les adultes.

2.2.1 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE : PERSONNE ÂGÉE

Chez la personne âgée, deux études ont vérifié les effets d'un entraînement aérobie sur la cognition. Fabre, Chamari, Mucci, Massé-Biron et Préfaut (2002) ont comparé les effets de trois conditions expérimentales sur la mémoire : un entraînement aérobie, un entraînement de la mémoire et un entraînement combiné. Après deux mois d'intervention, les deux groupes ayant participé à l'entraînement aérobie ont augmenté leur capacité aérobie maximale de façon significative comparativement à un groupe contrôle et au groupe ayant participé seulement à l'entraînement de la mémoire. De plus, les trois groupes se sont améliorés au quotient de mémoire de l'échelle de Weschler, comparativement au groupe contrôle, avec une amélioration significativement plus grande pour le groupe combiné. Les auteurs ont donc démontré que l'entraînement de la mémoire et l'entraînement aérobie sans composante cognitive affectaient de façon comparable les habiletés de mémoire chez les sujets âgés de plus de 60 ans.

Smiley-Oyen, Lowry, François, Kohut et Ekkekakis (2008) ont voulu vérifier les effets d'un entraînement aérobie et d'un entraînement musculaire de 10 mois sur la cognition de sujets âgés de plus de 65 ans. Les évaluations cognitives comprenaient quatre tests de temps de réaction, mesurant la vitesse de traitement de l'information et l'habileté d'inhibition de la réponse, et deux tests de fonctions exécutives, c'est-à-dire le Stroop mesurant la flexibilité mentale, la résistance à l'interférence et le contrôle cognitif, et le *Wisconsin Card Sorting Test* mesurant l'habileté de catégorisation. Suite à l'intervention, les résultats démontrent tout d'abord une amélioration significative de la capacité aérobie maximale pour les deux groupes entraînés, sans différence entre ceux-ci. Les seules améliorations cognitives observées ont été pour le test de Stroop : le groupe aérobie a significativement diminué le temps de réaction et le nombre d'erreurs pour la condition conflit couleur-mot, et le groupe musculation a significativement augmenté le nombre d'erreurs à ce même test. Les auteurs ont conclu que l'entraînement aérobie influençait seulement les performances cognitives aux tests requérant un contrôle exécutif, tel que la condition conflit couleur-mot du test de Stroop. Au contraire, l'entraînement musculaire n'a mené qu'à un effet considérablement inférieur et non-significatif sur le temps de réaction et à des changements contradictoires pour le nombre d'erreurs. Par contre, les améliorations comparables de la capacité aérobie suite aux deux interventions suggèrent que les deux entraînements ont sollicité des adaptations physiques similaires, et ceci rend discutable les effets observés sur le cerveau. Cette limite souligne aussi une importante lacune de l'étude, c'est-à-dire le manque de groupe contrôle pour vérifier que les changements cognitifs observés n'étaient conséquents qu'à l'intervention.

Conjointement, ces deux études suggèrent qu'un entraînement aérobie améliore la mémoire et certaines fonctions exécutives chez l'ainé. Par contre, étant donné que les études ont utilisé un volume d'entraînement et une intensité différents, il est difficile de déterminer la dose exacte d'entraînement qui mène à des améliorations pour chacune des ces fonctions. Fabre et al. (2002) ont conduit 2 mois d'entraînement à raison de 2 séances de 45 minutes d'intervalles par semaine, avec une intensité correspondant à la fréquence cardiaque au seuil ventilatoire. Smiley-Oyen et al. (2008) ont effectué 10 mois

d'entraînement, avec un volume de trois séances de 25 à 30 minutes par semaine, avec un pourcentage de 65 à 80% de la fréquence cardiaque maximale comme intensité. Ces interventions ont sollicité des adaptations physiques trop différentes pour comparer leurs résultats et conclure à un effet d'entraînement sur la cognition.

2.2.2 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE : ADULTE

Chez les sujets adultes, quatre études évaluant les effets d'un entraînement aérobic ont été recensées. Blumenthal et Madden (1988) ont comparé les effets de 12 semaines d'un entraînement aérobic et d'un entraînement de musculation sur la performance au test de Sternberg, une tâche sollicitant les habiletés de mémoire à court terme et exigeant un temps de réaction rapide. Les sujets, des hommes de 30 à 58 ans, répartis en deux groupes entraînés ont été comparés entre eux, et, malgré qu'une amélioration significative de la capacité aérobic maximale ait été observée pour le groupe aérobic, aucune amélioration cognitive n'est ressortie.

Pierce, Madden, Siegel et Blumenthal (1993) ont vérifié les effets de 16 semaines d'un entraînement aérobic et d'un entraînement de musculation sur plusieurs variables psychologiques et cognitifs chez des personnes de 29 à 59 ans avec hypertension modérée³. Ils ont évalué l'anxiété, la dépression, l'hostilité, les comportements à risques, la perception du support social, la perception du contrôle de soi et le contrôle émotif grâce à des questionnaires. Les tests neuropsychologiques utilisés étaient une version modifiée de l'Échelle de mémoire Wechsler pour mesurer la mémoire, l'empan de chiffre indirect pour la mémoire de travail verbale, l'empan de symboles pour la vitesse de traitement de l'information, le *Trail Making Test* pour la flexibilité mentale, le test de Stroop pour la flexibilité mentale, la résistance à l'interférence et le contrôle cognitif, l'apprentissage de paires pour l'apprentissage et la tâche de Sternberg pour la mémoire à court-terme et le temps de réaction. Suite aux deux entraînements, aucune différence n'est ressortie pour les

³ Comme les participants hypertendus de cette étude ne prennent aucune médication et qu'ils ont une hypertension modérée, nous les considérons potentiellement comparables à des sujets sains.

variables psychologiques et cognitives et seule une augmentation significative de la capacité aérobie pour le groupe participant à l'entraînement aérobie a été observée.

Masley, Roetzheim et Gualtieri (2009) ont effectué un entraînement aérobie chez des sujets âgés de 18 à 70 ans et ont vérifié les effets possibles sur la cognition grâce à une batterie de tests informatisée. Plusieurs tests ont été complétés et les scores ont été regroupés pour évaluer des habiletés cognitives spécifiques dont la mémoire, la vitesse psychomotrice, le temps de réaction, la flexibilité cognitive et l'attention. Suite à l'intervention, le groupe entraîné a augmenté significativement son habileté de flexibilité cognitive comparativement au groupe contrôle.

Finalement, Stroth, Hille, Spitzer et Reinhardt (2009) ont étudié l'effet d'un entraînement aérobie chez des sujets de 17 à 29 ans sur l'attitude et l'humeur mesurées à l'aide d'un questionnaire, la mémoire visuo-spatiale et verbale mesurées grâce à deux sous-tests, et l'attention sélective mesurée avec le test D2. Suite à l'intervention, des améliorations significatives de la capacité aérobie maximale, la mémoire visuo-spatiale et l'attitude positive, avec une tendance distincte à diminuer l'attitude négative, ont été constatées pour le groupe entraîné.

Comme ces études ont toutes évalué les effets d'un entraînement aérobie sur la cognition, une comparaison des résultats observés est possible pour tenter d'admettre une conclusion commune. Dans deux des études présentées, différents questionnaires évaluant les aspects psychologiques ont été utilisés. Les effets de l'entraînement ont donc été spécifiques à chaque mesure faite, c'est-à-dire une augmentation de l'attitude positive dans l'étude de Stroth et al. (2009), et aucun effet dans l'étude de Pierce et al. (1993) pour l'anxiété, la dépression, l'hostilité, les comportements à risques, la perception du support social, la perception du contrôle de soi et le contrôle émotif.

Lorsque l'on combine les tests communs dans ces études, plusieurs effets semblables et contradictoires ressortent. Aucun effet n'est ressorti dans les différentes études évaluant la mémoire à court-terme et l'attention. En ce qui a trait à la mémoire visuo-spatiale, Stroth et al. (2009) ont observé une amélioration suite à l'entraînement, alors que Masley et al. (2009) n'ont observé aucun changement sur cette habileté. Cette

divergence peut être expliquée par la combinaison des sous-tests évaluant la mémoire verbale et la mémoire visuelle dans la batterie de tests utilisée par Masley et al. (2009), comparativement à Stroth et al. (2009) qui ont séparé ces deux habiletés. La dernière fonction commune qui a été mesurée a été la flexibilité cognitive dans les études de Masley et al. (2009), qui ont observé une amélioration suite à l'entraînement, et Pierce et al. (1993), qui n'ont observé aucun effet. Deux raisons pourraient expliquer cette discordance. La première correspond à une autre combinaison faite dans la batterie de tests utilisée par Masley et al. (2009), qui ont inclus la performance au test de Stroop et à un test d'attention alternée pour mesurer la flexibilité cognitive en comparaison à la performance seule au test de Stroop et au *Trail Making Test* dans l'étude de Pierce et al. (1993). La deuxième explication pourrait correspondre à l'intensité et au volume d'entraînement divergeant entre ces deux études. L'intensité correspondait à 70% de la capacité aérobie maximale dans l'étude de Pierce et al. (1993) et à 70 à 85% de la fréquence cardiaque maximale dans l'étude de Masley et al. (2009). Le volume d'entraînement dans le protocole de Pierce et al. (1993) a été de 3 fois 35 minutes par semaine pour 16 semaines en comparaison à 5 à 6 fois 30 à 45 minutes par semaine pour 10 semaines dans le protocole de Masley et al. (2009). Ces différences mènent donc à des adaptations physiques différentes suite à l'entraînement qui auraient pu mener à des effets différents sur la cognition.

Ces études chez l'adulte suggèrent également que l'entraînement aérobie semble affecter positivement les fonctions cognitives. Cependant, elles ne permettent pas d'identifier un volume et une intensité d'entraînement nécessaire pour provoquer ces effets ainsi que les fonctions cognitives influencées.

2.2.3 – ENTRAÎNEMENT AÉROBIE : ENFANT

Davis et al. (2007) ont étudié les effets d'un entraînement aérobie sur les fonctions exécutives d'enfants obèses. Les sujets, âgés en moyenne de 9,2 ans, se situaient au-dessus du 85^e percentile pour l'indice de masse corporelle chez l'enfant, et présentaient un mode de vie sédentaire. Deux entraînements différents de la composante aérobie ont été faits pour

comparer les effets sur les performances à la batterie de tests *Cognitive Assessment System* (CAS). Les deux entraînements étaient pratiqués cinq jours par semaine pour quinze semaines et correspondaient en une série de jeux visant à maintenir la fréquence cardiaque plus élevée que 150 battements par minute sans objectifs d'amélioration de compétences spécifiques. Les activités comprenaient de la course, des jeux de chasse et poursuite, de la corde à danser et du basketball et soccer modifiés. La condition faible volume correspondait à 20 minutes d'activités aérobies par session, comparativement à 40 minutes pour la condition volume élevé. Le CAS est une batterie de tests cognitifs qui présente quatre catégories de trois sous-tests. L'échelle de planification mesure les habiletés de planification, d'association, de contrôle de soi et d'évaluation de la réponse, c'est-à-dire les habiletés associées aux fonctions exécutives. L'échelle d'attention mesure les différents processus attentionnels, c'est-à-dire l'attention soutenue, la concentration, l'attention sélective et la résistance à la distraction. L'échelle simultanée mesure l'intégration d'information pour créer des idées cohérentes et la compréhension de relations logiques. Finalement, l'échelle successive mesure l'intégration d'information pour organiser des logiques spécifiques incluant des suites ou des composantes syntaxiques. Les comparaisons faites avec les performances aux tests physiques ont démontré une amélioration significative du temps maximal de course sur tapis roulant pour les groupes entraînés. Les améliorations cognitives n'ont été observées que pour le groupe volume élevé et pour l'échelle de planification. Ainsi, les auteurs suggèrent une relation directe entre un volume d'activité intense et régulière et l'amélioration des fonctions exécutives chez l'enfant.

Chaque échelle de la batterie de tests utilisée dans cette étude comporte des sous-tests sollicitant les fonctions exécutives. Si l'entraînement avait effectivement affecté toutes les fonctions exécutives, on se serait attendu à ce que les performances à chaque échelle se soient améliorées, ce qui n'a pas été le cas dans cette étude. Ainsi, l'entraînement semble avoir un impact positif sur les fonctions exécutives des enfants, mais cette étude ne permet pas de clarifier si cet effet est global ou exclusif à certaines fonctions. De plus, plusieurs des activités pratiquées sollicitaient les habiletés motrices, ce qui amène une autre source possible des améliorations cognitives notées.

Ces études chez l'humain suggèrent donc que l'entraînement aérobique pourrait affecter positivement les fonctions cognitives. Par contre, comme très peu d'études ont été conduites suivant un entraînement suscitant des adaptations aérobiques, que les tests utilisés mesuraient différentes fonctions cognitives et que les résultats démontrent des effets nuls à significatifs, il est difficile de conclure à des effets globaux de l'entraînement sur la cognition ou exclusifs à certaines fonctions. Chez les enfants, la seule étude qui a été conduite a utilisé une batterie de tests unique qui combinait plusieurs tests et habiletés dans chaque échelle, ce qui ne permet pas la comparaison avec les autres études. Le dilemme est donc toujours présent à savoir si l'entraînement aérobique affecte globalement les fonctions cognitives ou si ces effets sont exclusifs à certaines fonctions, tant chez les enfants que chez les adultes ou personnes âgées.

2.3 – ENTRAÎNEMENT NEUROMOTEUR ET COGNITION : HUMAIN

Les protocoles de recherche comparant les effets d'un entraînement aérobique à un entraînement neuromoteur, comme les études conduites chez l'animal présentées dans la section 2.1, sont inexistantes chez l'humain. De plus, les études portant sur les habiletés motrices sont très limitées chez l'humain. Un premier groupe d'études a vérifié le lien possible entre les habiletés motrices et cognitives chez l'enfant en corrélant les performances cognitives aux performances motrices. Par exemple, Knight et Rizzuto (1993) et Nourbakhsh (1993) ont observé une corrélation significative entre les habiletés perceptivo-motrices (c'est-à-dire l'équilibre, la dextérité manuelle, la coordination globale statique et dynamique, la vitesse du mouvement et la coordination bilatérale) et la performance académique chez l'enfant. Livesey et al. (2006) ont étudié le lien entre la performance motrice et la cognition. Ils ont utilisé la batterie de tests *Movement ABC* pour mesurer la performance motrice, le test de Stroop pour la flexibilité mentale, la résistance à l'interférence et le contrôle cognitif et le test *Stop Signal* pour la capacité d'inhibition. Ils ont aussi inclus un questionnaire du comportement extraverti de l'enfant, rempli par

l'enseignant. Un score élevé à ce questionnaire traduit une attitude trop extravertie et dérangeante en classe, alors qu'un score bas correspond à une attitude calme et un état de concentration élevé lors des périodes d'enseignement. Suite aux analyses statistiques, les auteurs ont observé une corrélation significative de la performance motrice avec la performance au test de Stroop ainsi qu'avec le score au questionnaire. Les corrélations entre la performance au test *Stop Signal* et la performance motrice allaient dans le même sens, mais l'association était faible.

Ces études suggèrent donc un lien positif entre de bonnes habiletés motrices et les fonctions cognitives. Par contre, comme ces études étaient corrélationnelles descriptives et non-expérimentales, il s'agit d'une limite à l'identification d'un effet de la pratique d'activité physique sur la cognition.

2.3.1 – ENTRAÎNEMENT PERCEPTIVO-MOTEUR

Dans la littérature, trois études ont été recensées avec une orientation de la pratique d'activité physique vers une amélioration des habiletés motrices sans stimulation du système aérobie. Deux d'entre elles ont utilisé un entraînement perceptivo-moteur, tandis que l'autre a utilisé la pratique du yoga.

O'Connor (1969) a mené une étude qui testait les théories et techniques d'entraînement de Kephart (1960) chez des enfants de 1^{re} année. Le groupe contrôle recevait les cours d'éducation physique réguliers et le groupe expérimental participait à un programme d'entraînement des qualités motrices selon Kephart. Ce programme consistait en des activités d'équilibre sur poutre, des séries de sauts, des mouvements de gymnastique, des courses à obstacle, des jeux d'imitation de mouvements, du tetherball, du soccer et des activités stimulant les patrons moteurs de base et la poursuite oculaire. Pour vérifier les effets de l'entraînement, plusieurs habiletés physiques ont été mesurées et les sous-tests ont été regroupés en deux catégories ciblant la conscience latérale interne et la conscience latérale externe. Le *Perceptual Forms Test* a été utilisé pour mesurer la coordination visuo-perceptivo-motrice. Pour les habiletés intellectuelles, le *Metropolitan Readiness Test* a été

utilisé en pré-intervention pour mesurer le développement de l'alphabétisation chez les participants, et le *Metropolitan Achievement Test* a été utilisé en post-intervention pour mesurer les compétences de base et les processus de pensée critique et stratégique spécifiques au contexte scolaire. Les résultats ont démontré une amélioration de la majorité des habiletés physiques et de la conscience latérale interne significativement plus grande pour le groupe expérimental que pour le groupe contrôle (O'Connor, 1969). Aucune différence entre les groupes n'a été révélée pour les tests de conscience latérale externe, d'habiletés perceptivo-motrices et de lecture. Ainsi, les améliorations des habiletés motrices globales notées chez le groupe expérimental suite à l'entraînement selon Kephart n'ont pas affecté les habiletés perceptuelles ou académiques des enfants. Il est important de noter que, dans cette étude, les habiletés de lecture mesurées rendent impossible l'identification d'une relation entre l'entraînement moteur et la cognition, car il s'agit de mesures d'habiletés spécifiques au contexte scolaire. Celles-ci sollicitent les processus cognitifs, mais elles ne représentent pas des mesures distinctes des habiletés cognitives. De plus, un manque d'information rend incertain la présence ou non d'une stimulation aérobie dans les activités, ce qui pourrait amener une autre source possible d'adaptations et influencer les changements observés.

Une deuxième étude, conduite par McCormick et Schnobrich (1971), a testé l'effet d'un entraînement de type perceptivo-moteur sur la concentration chez des enfants d'une école Montessori (niveau pré-scolaire). Pendant les 7 mois que durait l'étude, le groupe expérimental recevait 30 minutes d'un entraînement perceptivo-moteur 3 fois par semaine, entraînement qui remplaçait l'entraînement régulier du programme Montessori (groupe contrôle). Les activités correspondaient à des séries d'exercices pour la coordination fine et globale, incluant des rotations de la tête et des bras, ramper, marcher, courir, etc. Les stimulations de l'endurance et de la force musculaire étaient minimales, l'emphase était mise sur la précision du mouvement et la concentration. La concentration et le contrôle de soi suivaient une progression : au départ les indications venaient de l'animateur, ensuite l'enfant répétait les consignes à voix haute, et finalement sans indications vocales. De plus, plusieurs techniques pour améliorer l'attention auditive et la concentration ont été insérées

dans les entraînements. Par exemple, on utilisait des codes dans les exercices comme la lettre p pour le bras gauche et la lettre «b» pour indiquer un mouvement avant. Plusieurs tests ont été conduits avant et après l'intervention : le *Peabody Picture Vocabulary Test* pour mesurer le niveau lexique respectif du sujet, le *Goodenough-Harris Draw-a-Person Test* permettant une mesure projective du statut psycho-émotif du sujet, l'*Auditory-vocal Sequencing* et le *Visual-motor Sequencing* pour l'attention et l'*Arrow-Dot Test* pour les habiletés perceptivo-motrices, l'impulsivité et le contrôle de soi. Le groupe expérimental a obtenu des résultats significativement supérieurs au groupe contrôle pour les tests d'attentions visuelle et auditive et de contrôle de soi après l'intervention. Aucune différence entre les groupes n'a été notée pour les autres tests. Ces résultats ont permis aux chercheurs de conclure à un effet positif de l'entraînement perceptivo-moteur sur l'attention visuelle et auditive et le contrôle de soi. Par contre, comme l'attention était stimulée dans les activités pratiquées, il est difficile d'attribuer ces améliorations à l'entraînement moteur seul.

2.3.2 – ENTRAÎNEMENT DE YOGA

La dernière étude a été conduite par Manjunath et Telles (2001) qui ont évalué l'effet d'un entraînement de yoga sur les fonctions exécutives. Cette activité constitue un entraînement neuromoteur, car le maintien des poses nécessite un bon niveau d'équilibre, de contrôle du mouvement et de coordination. Les auteurs ont vérifié les effets de la pratique sur la performance au test de la Tour de Londres, mesurant l'habileté exécutive de planification, chez des filles de 10 à 13 ans. L'entraînement correspondait à 75 minutes de yoga par jour pour un mois consacrées à la pratique des poses, du contrôle de la respiration, de la méditation, des chants et des techniques de relaxation. Le groupe contrôle suivait un programme d'activités physiques constitué de jogging et d'exercices de musculation avec poids libres. À la fin du mois, les participantes du groupe de yoga ont démontré une amélioration du temps de planification et d'exécution lors de la tâche comparativement aux participantes du groupe d'activités physiques. Par contre, comme la pratique de yoga comportait d'autres éléments que l'entraînement moteur, c'est-à-dire la méditation, la

respiration, les chants et la relaxation, ces autres stimulations dans la pratique auraient pu contribuer à ces changements. Dans ce sens, les auteurs suggèrent que le cortex préfrontal dorsolatéral serait impliqué dans la performance de la tâche de la Tour de Londres et dans la méditation, ce qui pourrait expliquer les améliorations observées.

Les résultats de ces études suggèrent un lien positif entre l'amélioration des habiletés motrices et des habiletés cognitives. Par contre, les limites des études reliées à l'entraînement neuromoteur rendent difficile l'identification d'un tel lien. Comme certaines études incluent des stimulations diverses dans l'entraînement, plus spécifiquement l'attention, la méditation et probablement le système aérobie, et que les mesures employées diffèrent, il devient difficile de relier ces études ensemble et de clarifier les effets d'un entraînement neuromoteur sur la cognition.

2.4 – CIRCUIT NEUROLOGIQUE

Les études présentées précédemment avaient comme hypothèse qu'un entraînement neuromoteur aurait un impact sur les fonctions cognitives. Hormis les études chez l'animal, aucun modèle neuropsychologique n'était associé à ces hypothèses pour tenter d'expliquer la provenance des effets potentiels d'un entraînement neuromoteur sur la cognition. Le modèle de Diamond (2000) pose l'hypothèse que le développement moteur et le développement de la cognition sont fondamentalement reliés. Ceci serait conséquent à une participation conjointe du cervelet et du cortex préfrontal dorsolatéral.

2.4.1 – CERVELET

Le rôle du cervelet (voir Figure 1) dans le contrôle moteur, la coordination, l'équilibre et la posture a été décrit dans plusieurs études cliniques et expérimentales. Cette implication du cervelet dans le contrôle du mouvement et, spécialement, dans les habiletés motrices complexes, a été décrite en premier par Gordon Holmes (1939), un neurologue anglais. C'est suite à des observations cliniques avec des patients blessés lors de la

première guerre mondiale qu'il a relié des déficits moteurs importants à des blessures par balle au cervelet. Par la suite, maintes études ont utilisé différents protocoles et techniques d'imageries cérébrales pour décrire les différentes contributions du cervelet dans les actions motrices : coordination d'une séquence d'activation de plusieurs muscles (Diedrichsen, Criscimagna-Hemminger, & Shadmehr, 2007), préparation des corrections motrices (Morton & Bastian, 2006), apprentissage d'une séquence de mouvement (Sadato, Campbell, Ibànez, Deiber, & Hallett, 1996), apprentissage d'une séquence de mouvement rythmée (Kawashima et al., 2000; Sakai, Ramnani, & Passingham, 2002), interaction de stimuli sonores et de réponses motrices (Chen, Penhune, & Zatorre, 2005), exécution des mouvements complexes des doigts lors de l'écriture (Katanoda, Yoshikawa, & Sugishita, 2001), manipulation d'objets présentant des dynamiques complexes (Milner, Franklin, Imamizu, & Kawato, 2007), coordination œil-main (Miall, Reckness, & Imamizu, 2001), régulation des mouvements volontaires et perception de stimulations tactiles (Fox, Raichle, & Thach, 1984). En combinant toutes ces observations sur le cervelet, Morton et Bastian (2006) y ont attribué trois rôles globaux : modulation du rythme, de la force et de l'ampleur de la contraction musculaire, intégration d'information pour le maintien de l'équilibre, et adaptation des patrons moteurs acquis pour la correction ou l'apprentissage de nouveaux mouvements. Doyon et al. (2002) ont décrit le cervelet comme étant un centre de coordination qui utilisait les inputs sensoriels de la périphérie pour engendrer avec précision le mouvement ou le contrôle moteur.

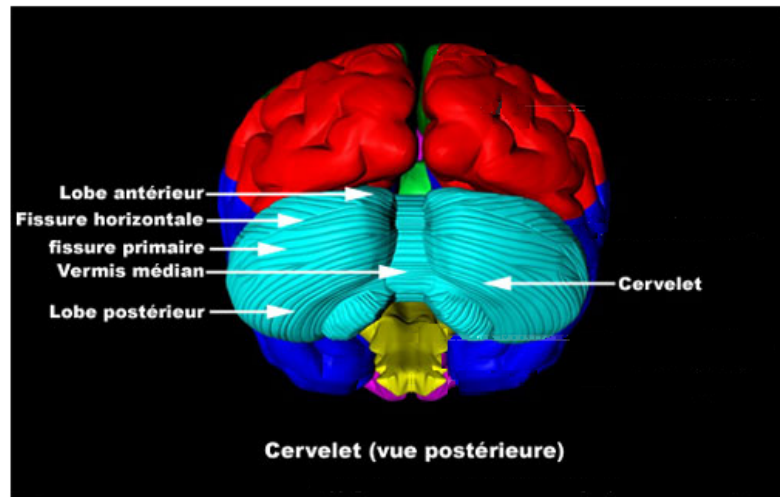


Figure 1 : Le cervelet (Marstzloff, 2009)

Depuis plus de deux décennies, une implication du cervelet dans les fonctions cognitives est étudiée. Cette contribution a été suggérée suite à des circuits nerveux identifiés entre le cervelet et d'autres régions du cortex (voir Figure 2) et suite à l'observation de déficits cognitifs chez des patients atteints au cervelet (Schmahmann, 2001; Thach, 2007). Même chez l'enfant, deux revues de la littérature ont démontré que des malformations et des lésions au cervelet affectaient les habiletés motrices et les fonctions cognitives supérieures, affectant spécialement l'apprentissage (Konczak & Timmann, 2007; Steinlin, 2007).

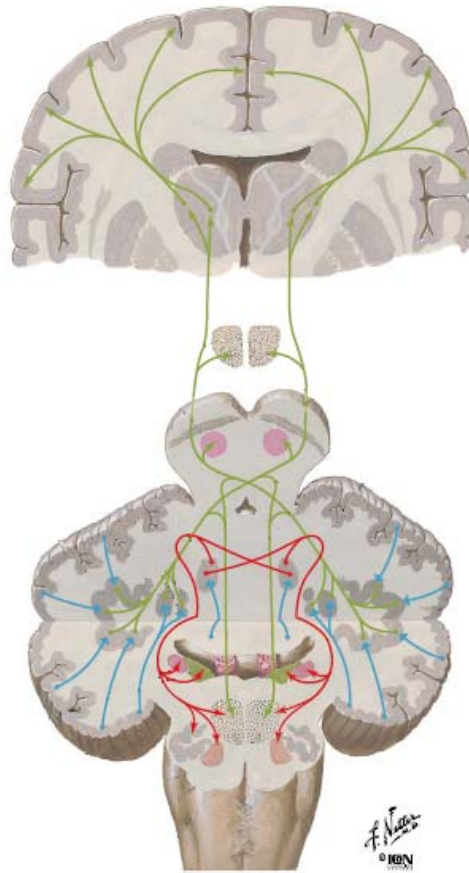


Figure 2 – Le cervelet et ses connections avec les régions du cortex (Netter, 2002)

De plus, grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, une implication du cervelet a pu être observée lors de différentes tâches cognitives (Desmond & Fiez, 1998). Kim, Uğurbil et Strick (1994) ont comparé l'activation du cervelet lors de la résolution d'un *Puzzle Pegboard*, une tâche où le sujet doit déplacer des tiges sur une planche trouée pour créer une suite spécifique. Une condition simple, où le sujet doit déplacer d'un trou à la fois les tiges vers l'autre côté de la planche, est comparée à une tâche de résolution de problème. Celle-ci exige du sujet de déplacer les tiges rouges à la droite de la planche et les bleues à la gauche, en respectant trois règles : une seule tige à la fois peut être déplacée, une tige peut être déplacée dans un trou adjacent ou sauter par-dessus une autre tige, et une tige peut être déplacée vers l'avant mais jamais vers l'arrière (voir Figure 3).

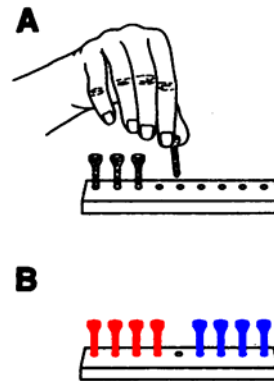


Figure 3 : A- Déplacement simple des tiges ; B- Déplacement avec résolution de problème (Kim et al., 1994).

Ils ont observé une activation du cervelet lors des deux tâches, avec une amplitude de deux à trois fois plus grande lors de la tâche de résolution de problème. Ils ont donc conclu que le cervelet était impliqué dans le contrôle du mouvement, avec une contribution tout aussi importante pour les fonctions cognitives. Dans le même ordre d'idée, Stoodley et Schmahmann (2009) ont effectué récemment une méta-analyse des études cliniques, expérimentales et celles utilisant la neuroimagerie pour identifier les différentes régions du cervelet impliquées dans diverses fonctions. Ils ont identifié une activation du cervelet pour les domaines du contrôle moteur, des habiletés somato-sensorielles et spatiales, du langage, de la mémoire de travail auditive, des fonctions exécutives, et des émotions.

2.4.2 – CORTEX PRÉFRONTAL DORSOLATÉRAL

Le cortex préfrontal est la structure associée aux fonctions cognitives qui permettent au mammifère de sélectionner des actions et des réponses basées sur les buts et plans internes plutôt que de seulement réagir aux exigences de l'environnement (Koechlin & Summerfield, 2007). Les fonctions exécutives comprennent plusieurs processus mentaux impliqués dans l'initiation d'un traitement de l'information régulier et le maintien de celui-

ci. Elles incluent les processus stratégiques, comme l'attention sélective, la représentation et le maintien d'objectifs, et les processus évaluatifs, comme le contrôle constant de la performance dosant l'attention sélective nécessaire au maintien d'une performance stable (Tamminga, 2000). Concrètement, elles permettent les habiletés cognitives telles que la planification, la mémoire de travail, le contrôle cognitif, la pensée abstraite, l'apprentissage de règle, l'attention sélective et la sélection de réponses motrices.

Anatomiquement, le cortex préfrontal se divise en trois parties : le cortex préfrontal latéral, le cortex orbitofrontal et le cortex frontal médial (Ridderinkhof et al., 2004). Le cortex préfrontal latéral se subdivise aussi en trois parties : le cortex préfrontal dorsolatéral (Coordonnées de Brodmann : BA9/46, BA46 et BA8a sur la Figure 4) le cortex préfrontal ventrolatéral et la jonction frontale inférieure. Malgré que des co-activations de ces subdivisions soient observées lors de situations suscitant un contrôle cognitif (Duncan & Owen, 2000), chaque région présente une spécialité fonctionnelle et les interactions entre celles-ci ne font que faciliter la performance à une tâche cognitive. Le cortex préfrontal dorsolatéral est principalement impliqué dans la sélection et l'inhibition de réponse. Cette région garde en mémoire à court terme les règles d'une tâche et les facteurs influençant le choix de la réponse, comme les choix passés et leurs conséquences, pour utiliser ces informations et sélectionner la réponse appropriée. Il s'agit d'un rôle d'intégration assuré par cette région qui contribue à l'apprentissage dynamique (Ridderinkhof et al., 2004). La capacité d'inhiber une réponse consiste à annuler une réponse inappropriée en considérant le lien stimulus-réponse d'un nouveau contexte et en supprimant les représentations en mémoire interférant avec la nouvelle prise de décision (Aron, Dowson, Sahakian, & Robbins, 2003). Conjointement avec le cortex préfrontal ventrolatéral, le dorsolatéral inhibe les réponses lors de tâches *Go/NoGo* et le *Stop Signal* (de Zubicaray, Andrew, Zelaya, Williams, & Dumanoir, 2000; Rubia, Smith, Brammer, & Taylor, 2003).

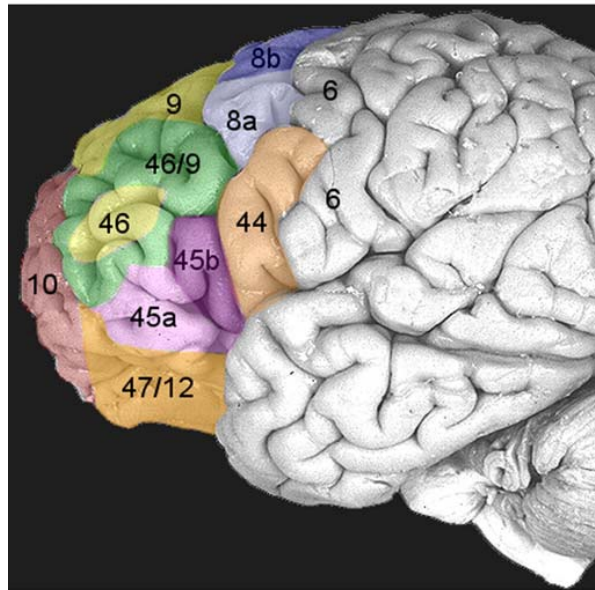


Figure 4 – Cortex préfrontal. Les chiffres réfèrent aux coordonnées de Brodmann (Ridderinkhof et al., 2004).

2.4.3 – CIRCUIT FRONTO-CÉRÉBELLEUX

Grâce aux différentes techniques d'imagerie cérébrale, une activation du cervelet a été observée lors de diverses tâches exécutives impliquant le cortex préfrontal dorsolatéral. Quelques études ont observé cette co-activation lors d'une tâche de génération de verbes (Raichle et al., 1994; Seger, Desmond, Glover, & Gabrieli, 2000). Le test consiste à donner un nom au sujet et on lui demande de générer rapidement un verbe y étant relié, répondant à la question « qu'est-ce que cela fait? » ou « qu'est-ce que l'on fait avec cela? ». Un autre test est la fluence verbale, où le sujet doit générer un maximum de mots débutant par une lettre donnée pendant une minute en respectant quatre règles : aucun nom de personne, d'endroit, de chiffres, et générer des mots différents n'appartenant pas à la même famille (Gauthier, Duyme, Zanca, & Capron, 2009; Schlösser et al., 1998). Lors de deux tâches de mémoire de travail, l'empan de chiffre inverse (Gerton et al., 2004) et la séquence de lettre (Braver et al., 1997), l'activité du cervelet a été observée conjointement à celle du préfrontal. Pour l'empan de chiffre inverse, on demande au sujet de rappeler dans l'ordre

inverse une séquence de chiffre donnée, tandis que pour la séquence de lettre, le sujet doit rappeler la lettre qui précède un stimulus spécifique dans une séquence. Finalement, les résultats de Berman et al. (1995) ont démontré une co-activation lors d'une tâche de catégorisation, le *Wisconsin Card Sorting test*. Pour ce test, le sujet doit identifier une règle appropriée pour catégoriser des cartes en se basant sur le feedback positif ou négatif de l'évaluateur. Ainsi, le cervelet et le cortex préfrontal dorsolatéral semblent constituer les éléments centraux d'un important circuit nerveux. Middleton et Strick (2001) ont étudié les projections nerveuses du cervelet et ils ont identifié des outputs nerveux du cervelet vers le thalamus se dirigeant ensuite au cortex préfrontal dorsolatéral. De plus, ils ont conduit l'expérience inverse et ont identifié des outputs du préfrontal au cervelet, seulement pour la partie dorsolatérale. Ils ont donc suggéré que l'implication du cervelet dans les fonctions exécutives associées au cortex préfrontal dorsolatéral s'appuyait sur des bases anatomiques.

Les autres études permettant d'identifier un lien entre ces deux structures ont été conduites en milieu clinique. La diaschise est un trouble correspondant à une diminution de l'activité neuronale d'une région du cerveau provoquée par une diminution des stimulations nerveuses encourue par une région déficitaire. Ainsi, Miura et al. (1994) ont observé une diaschise du cervelet suite à un infarctus de l'artère cérébrale médiale, desservant le cortex frontal, incluant le préfrontal. Étudiant la liaison inverse, Boni et al. (1992) ont observé une diminution de la perfusion sanguine au cortex préfrontal suite à un dommage au cervelet. Chez les enfants avec un déficit d'attention avec hyperactivité, on dénote une co-morbidité importante avec un déficit moteur (Kadesjo & Gillberg, 1998; Klimkeit, Sheppard, Lee, & Bradshaw, 2004). De plus, des modifications dans la structure et les fonctions du cortex préfrontal et du cervelet ont été observés comparativement à des sujets sains (Casey et al., 1997; Schneider, Retz, Coogan, Thome, & Rösler, 2006).

Diamond (2000) a suggéré que ce circuit entre le cervelet et le cortex préfrontal dorsolatéral était le lien entre le développement moteur et le développement cognitif. Comme les études présentées plus tôt supportent cette hypothèse, il pourrait s'agir de l'explication neurologique des bienfaits de l'activité physique sur la cognition. Le cervelet étant impliqué dans le mouvement et dans les tâches cognitives complexes, un entraînement

stimulant son rôle moteur pourrait influencer le circuit nerveux avec le cortex préfrontal dorsolatéral et améliorer les performances aux tâches exécutives y étant reliées. C'est sur cette hypothèse que se base la présente étude.

CHAPITRE 3 – OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

3.1 – OBJECTIFS

Le but principal de cette étude est de clarifier le lien positif entre l'activité physique et ses effets sur la cognition. Le présent protocole permettra de clarifier si les changements cognitifs observés suite à l'entraînement sont spécifiques à l'activité pratiquée et si ces effets sont globaux sur la cognition ou exclusifs à certaines fonctions, et ainsi, précisera les effets possibles de l'entraînement physique sur la cognition. De plus, nous tenterons d'introduire un modèle neurologique pour expliquer les effets observés. Les objectifs spécifiques sont donc d'évaluer les effets d'un entraînement neuromoteur et d'un entraînement de la filière aérobie sur la cognition, et de clarifier si ces effets seront distincts pour les fonctions exécutives et la mémoire à long-terme ou globaux pour toutes les fonctions cognitives mesurées.

3.2 – HYPOTHÈSES

- 1) Comme la littérature, incluant les études conduites chez l'animal et l'humain, ne permet pas d'identifier un effet cognitif spécifique suite à un entraînement neuromoteur, nous avons basé cette première hypothèse sur le modèle de Diamond (2000). Ainsi, nous croyons que l'entraînement des qualités motrices reliées au cervelet, c'est-à-dire la coordination, l'agilité, le contrôle du mouvement, l'équilibre, le rythme et la vitesse, sans composante aérobie ou cognitive, améliorera les fonctions exécutives associées au circuit neurologique entre le cortex préfrontal dorsolatéral et le cervelet.
- 2) Les études évaluant les effets d'un entraînement aérobie ont démontré plusieurs effets positifs sur différentes fonctions cognitives chez l'enfant, l'adulte et la personne âgée. C'est pourquoi nous croyons que l'entraînement aérobie, sans

composante motrice ou cognitive, améliorera les fonctions exécutives et la mémoire à long-terme, reflétant un effet plus global sur le cerveau.

- 3) Bien que la littérature sur les effets de différents types d'entraînement physique sur le cerveau ne soit pas précise, les études suggèrent tout de même des adaptations neuroanatomiques spécifiques au type d'exercice pratiqué. Ainsi, nous croyons que les contributions relatives de chaque entraînement (aérobie et neuromoteur) sur la cognition seront différentes chez les enfants.

CHAPITRE 4 – MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

4.1 – PARTICIPANTS

Trois classes de 6^e année ont chacune constitué les groupes d'entraînement aérobic (AE), d'entraînement neuromoteur (NM) et contrôle (CT). Le recrutement s'est fait grâce à l'implication de professeurs du primaire. Les classes ont été attribuées aux groupes expérimentaux de façon aléatoire. Tous les élèves de chaque classe participaient aux activités, cependant, pour que leurs résultats soient inclus dans les analyses, les sujets devaient rencontrer les critères d'inclusion. Ils ne devaient présenter aucun trouble d'apprentissage, trouble neurologique ou problème de santé physique connu, ne devaient jamais avoir subi de commotion cérébrale ou de coups répétitifs à la tête (par exemple, coups de tête au soccer), et devaient tous avoir une vision normale ou normale après correction. Ceci était vérifié à l'aide d'un questionnaire de développement rempli par les parents (Annexe 1). De plus, les sujets devaient avoir complété au minimum 80% de l'entraînement et avoir complété les tests d'évaluation pré et post intervention. Par l'entremise des enseignantes et des enfants, les formulaires de consentement des parents et d'assentiment de l'enfant (Annexe 2) et le questionnaire de développement étaient acheminés aux parents, accompagnés d'une description vulgarisée du projet (Annexe 3). Ce projet de recherche a été approuvé par le Comité Scientifique du Département de Kinésiologie et par le Comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé de l'Université de Montréal (voir Avis du Comité Scientifique en Annexe 4 et Certificat d'éthique en Annexe 5).

Les classes comptaient 74 enfants au total, mais après vérification des critères d'inclusion, du consentement des parents et de l'assentiment des enfants, les résultats de 54 élèves ont été inclus dans cette étude à raison de 20 pour NM, 19 pour AE et 15 pour CT. Ils étaient tous âgés entre 11 et 13 ans, pour une moyenne d'âge de 11,4 ans (voir Tableau 2). Un test de quotient intellectuel (QI) a été conduit avant le début du projet pour vérifier que chaque enfant se situait à un niveau normal et que les trois groupes étaient comparables

(voir Section 4.5 pour une description détaillée du test et le Chapitre 5 – Résultats pour les analyses conduites).

Tableau 2 - Participants

	NM	AE	CT	Total
Nombre				
Total	20	19	15	54
Garçons	8	10	8	26
Filles	12	9	7	28
Âge (ans)	11,45	11,26	11,5	11,4
	NM : Neuromoteur	AE : Aérobie	CT : Contrôle	

L'effet du genre sur la performance aux tests neuropsychologiques tend à être présent pour certaines fonctions cognitives et absent pour d'autres (Brocki & Bohlin, 2004; Gauthier et al., 2009; Kelly & Britton, 1996; Seidman et al., 2005). Ainsi, nous avons conduit des analyses comparatives des performances entre les deux sexes, et comme aucune différence n'est ressortie pour aucun des tests, nous avons éliminé ce facteur de nos analyses subséquentes.

4.2 – DÉROULEMENT

L'intervention correspondait à 30 minutes d'entraînement aérobie ou neuromoteur par jour d'école en classe, pour 10 semaines, en ajout au programme d'éducation physique régulier. L'étudiante de la présente maîtrise étant kinésologue (M.C.M.), elle planifiait chaque séance d'entraînement et animait le premier entraînement de chaque semaine. Pour le reste de la semaine, les enseignants respectifs de chaque classe animaient les séances en suivant le plan d'entraînement. À deux reprises pour NM, M.C.M. a animé une deuxième séance entraînement dans la semaine car l'enseignant était absent. Au total, 5 séances d'entraînement ont été annulées pour cause de congé pédagogique pour les deux groupes. Les évaluations ont été complétées avant et après les 10 semaines d'intervention et étaient

constituées d'une séance collective et d'une séance individuelle. La séance collective s'est déroulée en classe et en gymnase, alors que les séances individuelles avec chaque enfant se sont déroulées dans des locaux ou bureaux des écoles. Les tests conduits collectivement étaient le test de QI (pré-test seulement) et le test de la capacité aérobie (voir la description des tests dans les sections 4.4 et 4.5). Les tests cognitifs et les tests de qualités motrices ont été complétés individuellement. En collaboration avec la Clinique de Kinésiologie de l'Université de Montréal, des étudiants-stagiaires ont participé à l'évaluation des enfants. Les étudiants-stagiaires ont tous suivi une formation de deux heures, afin d'apprendre les tests et de pratiquer la passation avec un faux-sujet. Par la suite, ils évaluaient individuellement des enfants, ce qui a permis de faciliter la passation de tests d'un grand nombre d'enfant dans un temps restreint. Chaque évaluateur a suivi le même protocole de passation des tests et a fourni les mêmes consignes aux enfants.

4.3 – ENTRAÎNEMENTS AÉROBIE ET NEUROMOTEUR

Les séances d'entraînement étaient complétées dans la classe, à l'exception de quelques séances pour le groupe NM. Un local vide était quelquefois disponible, et l'enseignant avait l'option d'y faire les activités pour avoir plus d'espace. Pour le groupe AE, deux séances par semaine étaient complétées dans un auditorium, pour diminuer le bruit pour les locaux adjacents. Les entraînements étaient tout de même planifiés pour être facilement pratiqués en classe. Dans les deux groupes expérimentaux, l'échelle de perception de l'effort pour enfants OMNIbus a été modifiée et utilisée pour contrôler l'intensité de l'exercice (Robertson et al., 2005). Une traduction française a été faite ainsi qu'un ajout de figures pour chacun des 10 niveaux (voir Annexe 6). Les enfants du groupe NM ont reçu l'instruction de toujours rester sous le 3^e niveau «Très facile», alors que le groupe AE évoluait entre les niveaux 6 «Essoufflant» et 10 «Crevant».

L'entraînement neuromoteur visait à développer les qualités motrices telles que la coordination, l'équilibre, l'agilité, la vitesse, le rythme et le contrôle du mouvement. Les activités suivaient une progression en difficulté et incluaient du yoga, des jeux d'imitations

et de balle, des séquences diverses de déplacements et de mouvements, des mouvements de danse, du langage des signes et des activités écrites. La musique était utilisée lors de certaines activités, dont quelques séquences de mouvements, la danse et le langage des signes. Toutes les activités excluaient quelque stimulation aérobie et cognitive.

L'entraînement aérobie visait à développer la capacité aérobie maximale en progressant vers des séances par intervalles à haute intensité (Gormley et al., 2008). Les activités correspondaient à du jogging sur place et de la montée et descente de marche, avec une stimulation motrice minimale et aucune composante cognitive. L'intensité était modulée avec des changements de vitesse ou d'amplitude de mouvement. La musique était utilisée quelquefois pour motiver les enfants, sans indications sur le rythme, mais bien sur l'intensité à atteindre.

Le groupe contrôle suivait le programme d'éducation physique régulier. La participation des enfants de ce groupe s'est limitée aux évaluations complétées avant et après les dix semaines du programme.

4.4 – ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ AÉROBIE MAXIMALE ET DES HABILITÉS MOTRICES

Tous les tests ont été complétés avant et après l'intervention et ont été sélectionnés parmi des batteries de tests validées. Comme mentionné précédemment, seul le test de capacité aérobie a été complété collectivement, les autres tests étaient inclus dans l'évaluation individuelle.

CAPACITÉ AÉROBIE MAXIMALE : TEST NAVETTE DE 20 MÈTRES

(OLDS, TOMKINSON, LÉGER, & CAZORLA, 2006)

Pour ce test, les participants sont dans un gymnase et reçoivent l'indication de courir entre deux lignes distancées de 20 mètres. Ils doivent suivre une cadence imposée par un signal sonore d'une bande pré-enregistrée. La vitesse initiale est de 8,5 km/h et

augmente de 0,5 km/h à chaque minute, jusqu'à ce que l'enfant ne puisse plus suivre la cadence pour cause de fatigue. La vitesse du dernier palier complété, à une précision de 0,25 km/h, et l'âge du participant sont utilisés dans l'équation de Léger, Mercier, Gadoury et Lambert (1988) pour déterminer la capacité aérobie maximale.

ÉQUILIBRE STATIQUE : TEST D'ÉQUILIBRE FLAMINGO

(MONYEKI ET AL., 2005)

Cette tâche provient de la batterie de tests Eurofit et mesure l'équilibre général. Les participants ont 15 essais pour réussir à rester en équilibre 60 secondes sur une poutre de 3 cm de large. La jambe opposée est tenue avec la main du même côté (voir Figure 5) et l'enfant choisi lui-même la jambe qu'il préfère pour chaque essai. Un essai est échoué lorsque l'enfant descend de la poutre, lâche la jambe tenue par la main ou met la main libre au sol. Le temps maximal atteint sur la poutre est noté, à concurrence de 60 secondes.



Figure 5 – Position à respecter pour le test d'équilibre Flamingo

ÉQUILIBRE DYNAMIQUE : SAUTS EN ZIGZAG

(HAGA, 2008)

Cette tâche provient de la batterie de tests Mouvement ABC et mesure l'équilibre général dynamique. Les participants doivent sauter sur six carrés (30 cm x 30 cm) placés en zigzag sur le plancher (voir Figure 6). Ils doivent respecter quatre règles : départ sur un pied, un seul saut par carré sans rebond, le pied ne doit jamais dépasser la bordure du carré et il faut être stable et en contrôle sur le dernier carré. Les participants ont deux essais par jambe pour réussir la tâche en respectant les quatre règles, et le meilleur temps est utilisé pour les analyses.

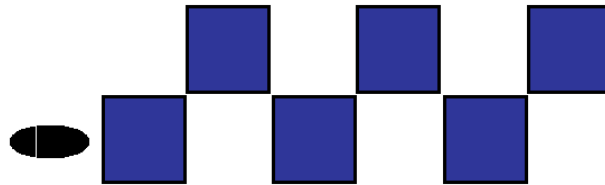


Figure 6 – Test de sauts en zigzag

VITESSE ET COORDINATION : TEST DE FRAPPE

(MONYEKI ET AL., 2005)

Sous-test de la batterie de tests Eurofit, cette tâche mesure la vitesse et la coordination des membres supérieurs. Deux rectangles sont placés à 60 cm de distance sur une table, avec un cercle équidistant entre ceux-ci (voir Figure 7). Assis près de la table, le participant doit toucher chaque rectangle 25 fois, aller et retour avec la même main en gardant l'autre main fixée sur le cercle. Avant de faire l'essai pour chaque main, le participant fait cinq allers et retours de pratique avec chaque main. La mesure utilisée pour les analyses est le meilleur temps effectué avec la main la plus rapide.



Figure 7 – Test de Frappe

DEXTÉRITÉ FINE : *GROOVED PEGBOARD*

(LEVINE, MILLER, BECKER, SELNES, & COHEN, 2004)

Cette tâche mesure la coordination visuo-motrice complexe. Le test consiste à insérer des tiges avec une forme spécifique dans des trous et à compléter la planche le plus rapidement possible (voir Figure 8). Ceci exige d'enligner les tiges dans la bonne direction pour qu'elles s'insèrent facilement. Un essai d'une ligne par main est permis avant de compléter la planche avec chaque main. Le temps pris pour compléter la planche avec la main la plus rapide est utilisé pour les analyses.



Figure 8 – *Grooved Pegboard*

4.5 – ÉVALUATION DES FONCTIONS COGNITIVES

Tous les participants ont complété les tests cognitifs avant et après l'intervention. Les tests ont été choisis en respectant deux critères : la fonction cognitive mesurée et les régions du cerveau sollicitées lors de la passation du test. Deux versions de chaque test ont été utilisées pour diminuer l'effet de pratique, à l'exception du test de QI qui n'a été complété qu'une seule fois avant l'intervention. Comme mentionné plus tôt, seul le test de QI a été complété collectivement, tous les autres tests étaient faits lors de la séance d'évaluation individuelle.

QUOTIENT INTELLECTUEL : TEST D'APTITUDE NON-VERBALE DE NAGLIERI (NNAT)

(NAGLIERI & RONNING, 2000)

Le NNAT mesure les habiletés non-verbales générales grâce à l'utilisation de matrices analogiques. Avec une progression en difficulté, le participant doit compléter des matrices de formes et de dessins géométriques, en choisissant parmi cinq options (voir Figure 9). Celles-ci permettent de mesurer quatre types de raisonnement logique : le complément de patron, le raisonnement analogique, le raisonnement en série et la représentation spatiale. Le nombre de bonnes réponses a été utilisé pour comparer les trois groupes entre eux.

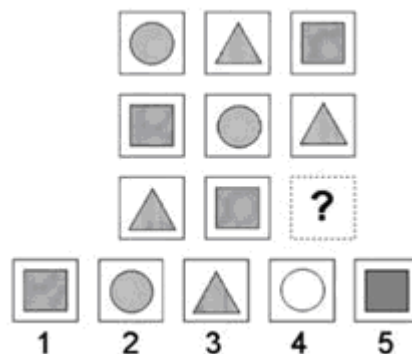


Figure 9 – Exemple de matrice du NNAT

MÉMOIRE À LONG TERME : TEST DES 15 MOTS DE REY, ASSOCIÉ AUX LOBES TEMPORAUX

(SAYKIN ET AL., 1999)

Cette tâche mesure l'apprentissage verbal et la mémoire à long terme. Le participant doit écouter et rappeler une même liste de 15 mots cinq fois ; le nombre de mots rappelés dans ces cinq essais correspond à la mesure de l'apprentissage (première mesure dépendante). Ensuite, une nouvelle liste de 15 mots est dite au participant qui doit en rappeler le maximum. Finalement, suite à un délai de 30 min, on demande au participant de rappeler le maximum de mots possible de la première liste présentée sans qu'il la réentende, ce qui correspond à une mesure de la mémoire à long terme (deuxième mesure dépendante).

FONCTIONS EXÉCUTIVES : EMPAN DE CHIFFRE INDIRECT, ASSOCIÉ AU CIRCUIT FRONTO-CÉRÉBELLEUX

(GERTON ET AL., 2004)

Cette tâche provient de la batterie de tests Échelle d'intelligence de Weschler pour enfants et mesure la mémoire de travail verbale. Le participant doit écouter une séquence de chiffres et la rappeler dans l'ordre inverse. Lorsque deux essais de même longueur sont réussis, on allonge d'un chiffre la séquence à rappeler. Le nombre d'essais correctement rappelés correspond au score.

FONCTIONS EXÉCUTIVES : FLUENCE VERBALE, ASSOCIÉ AU CIRCUIT FRONTO-CÉRÉBELLEUX

(SCHLÖSSER ET AL., 1998)

Cette tâche provient de la batterie de tests D-Kefs et mesure l'extraction verbale. En 60 secondes, le participant doit générer le plus de mots possibles débutant par une lettre donnée. Quatre règles doivent être respectées : aucun nom de chiffre, d'endroit et de personne et les mots doivent être de différentes familles. Le nombre de mots générés lors de trois essais correspond au score.

FONCTIONS EXÉCUTIVES : GÉNÉRATION DE VERBES, ASSOCIÉ AU CIRCUIT FRONTO-CÉRÉBELLEUX

(RAICHLE ET AL., 1994)

Ce test mesure l'association et l'extraction verbale. Pour 40 noms, le participant doit générer un verbe y étant relié, répondant aux questions «Qu'est-ce que cela fait?» ou «Qu'est-ce que l'on fait avec cela?». Le score est calculé avec la proximité sémantique du verbe généré : 2 points sont attribués lorsque le participant génère un verbe qui répond directement à l'une des deux questions, 1 point est attribué s'il s'agit d'un verbe sans relation sémantique avec le nom et aucun point n'est attribué s'il le mot généré n'est pas un verbe. Le pointage et le temps moyen pour générer une réponse sont utilisés dans les analyses.

4.6 – ANALYSES STATISTIQUES

Une série d'analyses de la variance (ANOVAs) a été faite pour chaque variable dépendante avec le groupe (trois niveaux : NM, AE et CT) comme variable inter-sujets et le temps (deux niveaux : pré- et post-intervention) comme variable intra-sujet. Les interactions significatives ont été interprétées grâce à des analyses locales : tests *t* de Student pour vérifier la différence pré- et post-intervention intra-groupe, ANOVAs simples avec test de Tukey pour vérifier les différences inter-groupes avant et après l'intervention et calcul de la taille de l'effet avec le *d* de Cohen. Toutes les analyses statistiques ont été conduites avec le logiciel SPSS 16,0 Français pour Windows.

CHAPITRE 5 – RÉSULTATS

Les résultats de notre étude sont présentés sous forme d'article scientifique. L'article présent est en soumission au moment du dépôt de ce mémoire. Toutes les exigences concernant les droits d'auteurs ont été considérées de sorte que les règles de probité et de propriété intellectuelle ont été respectées (voir Annexe 7).

Comparison of neuromotor and aerobic training on cognitive functions in children

Marie-Claude Ménard and Dave Ellemberg

Département de kinésiologie, Université de Montréal, Québec, Canada

Centre de recherche en neuropsychologie et cognition, Montréal, Québec, Canada

Abstract

Considering the neuronal circuit between the cerebellum and the dorsolateral prefrontal cortex, we hypothesized that neuromotor training will improve executive functions associated with the prefrontal cortex. Because aerobic training positively affected different cognitive functions in previous studies, we hypothesize that this type of exercise will improve executive functions and long-term memory. Three sixth grade classes (mean age = 11.4 years) were randomly assigned to neuromotor (n=20), aerobic (n=19), and control (n=15) conditions. We ensured that the motor training did not stimulate aerobic capacity and that the aerobic intervention was devoid of a motor training component. The exercise sessions for the two training groups consisted in 30 minutes per school day, took place during class time, and lasted for 10 weeks; the control group followed the regular school program. Motor and cognitive tests were administered before and after the intervention. A series of ANOVA's revealed that neuromotor training significantly enhanced verbal fluency and had a marginal effect on verb generation, executive functions related to the fronto-cerebellar circuit, and that aerobic training led to a marginal improvement for verbal fluency. Therefore, our results showed differential improvements in executive functions induced by both neuromotor and aerobic training.

Key words: exercise – cognition – childhood development – motor coordination – aerobic exercise

PsycINFO Classification code: 2340 Cognitive Processes

1- Introduction

A debate in the literature exists as to whether training of motor abilities results in an improvement in cognitive functions (Burns, O'Callaghan, McDonell, & Rogers, 2004; Knight & Rizzuto, 1993; Reynolds, Nicolson, & Hambly, 2003). In the rodent model, animals living in an enriched environment, enabling motor training (Gornicka-Pawlak, Jabłońska, Chyliński, & Domańska-Janik, 2009), improve their performance on spatial learning tasks compared to animals living in standard conditions (Harburger, Lambert, & Frick, 2007; Leggio et al., 2005). However, animals show the same kind of improvements after treadmill or voluntary running (Anderson et al., 2000; Henriette van Praag, Shubert, Zhao, & Gage, 2005). Nevertheless, other investigations showed that neurological adaptations are specific to the exercise protocol. An enriched environment increases synaptogenesis in the cerebellum and cellular survival and differentiation in the dentate gyrus, whilst running increases angiogenesis in the cerebellum and neurogenesis in the hippocampus (Anderson et al., 1994; Black, Isaacs, Anderson, Alcantara, & Greenough, 1990; Kleim et al., 2007; H. van Praag, Kempermann, & Gage, 1999). It should be noted that the enriched environment model likely not only stimulates motor abilities, but also familiarises the animal with the use of spatial cues and reduces fear reactions in new environments like in the spatial memory task (Rose, Love, & Dell, 1986; H. Van de Weerd et al., 2002; H. A. Van de Weerd, Van Loo, Van Zutphen, Koolhaas, & Baumans, 1997)

In humans, although physical exercise appears to have a positive effect on cognition, it is yet unclear whether aerobic or motor training contribute similarly to improvements in cognitive functioning and whether their effects are global or specific to certain cognitive functions (Hillman, Erickson, & Kramer, 2008; Tomporowski, Davis, Miller, & Naglieri, 2008). Studies investigating the effects of aerobic training in adults and the elderly show improvements in some executive functions and in long-term memory (Fabre, Chamari, Mucci, Massé-Biron, & Préfaut, 2002; Masley, Roetzheim, & Gualtieri, 2009; Smiley-Oyen, Lowry, Francois, Kohut, & Ekkekakis, 2008; Stroth, Hille, Spitzer, & Reinhardt, 2009). The only study investigating the effects of aerobic training in children showed improvement on the planning scale of the Cognitive Assessment System after a high-dose aerobic training (Davis et al., 2007). However, differences in the exercise

protocols used and in the cognitive tests administered limits the interpretation of these findings, most studies investigating a restricted number of cognitive domains.

Few studies investigated the effects of motor training on cognitive abilities. Manjunath and Telles (2001) showed improvement in planning, execution time and number of moves on the Tower of London task in girls participating in yoga activities, including meditation, music and relaxation techniques. Because the yoga also included other components that could potentially stimulate certain aspects of cognitive functioning, such as meditation and relaxation, it is impossible to attribute the cognitive changes measured to the motor training only. O'Connor (1969) tested the effects of a Kephart-type gross motor activity programme (Kephart, 1960) in first graders. The exercises included gymnastics and soccer-type activities aiming at developing basic locomotor patterns and oculomotor pursuit. The trained children showed significant improvements in physical abilities and in internal lateral awareness but no change in their perceptual or academic abilities. McCormick and Schnobrich (1971) investigated the effects of a perceptual-motor training intervention in preschool children, consisting in gross- and fine-motor exercises, combined with auditory and visual stimulation. They observed an improvement in auditory and visual attention spans, but given that the programme also stimulated attentional abilities, it is difficult to attribute the cognitive changes to the motor training.

Accumulating evidence suggests a close relationship between the brain structures involved in motor abilities and those involved in certain cognitive functions. Retrograde transneuronal transport, neuroimaging, brain lesions, and studies of brain pathology led to the identification of a neurological circuit between the cerebellum and the dorsolateral prefrontal cortex (see Diamond, 2000 for a review). The prefrontal cortex is a critical structure for executive functions including working memory, categorization, and fluency (Stuss & Knight, 2002) whilst the cerebellum is a structure known to participate in motor functions including motor control, motor learning, posture, and balance (Doyon et al., 2002; Morton & Bastian, 2006). Functional neuroimaging studies show increased activation in the cerebellum when a cognitive task activates the prefrontal cortex. This co-activation is found for executive functions like those solicited by the Wisconsin Card Sorting test (Berman et al., 1995), the Paced Serial Addition Task, a working memory task

(Hayter, Langdon, & Ramnani, 2007), a verb generation task (Raichle et al., 1994), and a verbal fluency task (Schlösser et al., 1998).

The present study was designed to clarify aforementioned issues, i.e. relative contribution of motor skill and aerobic training on cognitive functioning in children, by determining the effects of two different exercise programmes on long-term memory and executive functions in six graders. Based on the cerebellum's implication in motor functions, the neuromotor training intervention focused on coordination, movement control, stability, agility, rhythm, and velocity, with no cognitive or aerobic stimulation. On the other hand, the aerobic training consisted of repetitive stepping and jogging exercises in order to avoid motor learning. Moreover, given the evidence of a neurological circuit between the cerebellum and the dorsolateral prefrontal cortex, we used cognitive tests assessing executive functions known to co-activate these two regions. We also included a long-term memory test because of possible effects of aerobic training on this cognitive ability and to clarify whether exercise results in overall effects on cognition or if the effects are exclusive to certain cognitive domains. Based on the functional circuit proposed by Diamond (2000) linking the cerebellum and the prefrontal lobes, we hypothesise that motor skill training will improve executive functions. Further, we expect that the aerobic training intervention will lead to improvements of all cognitive functions tested.

2- Methods

2.1- Participants

Fifty-four six graders from 11 to 13 years of age ($M = 11.4$ years, $SD = 0.08$) participated in the study. The cohort consisted of three classes and each student from each of the classes participated in the study; however, for their data to be included in the analysis the children could not present learning difficulties, neurological problems or medical conditions. This was verified with the help of developmental questionnaires completed by the parents. They also completed a written consent form and each child provided written assent. This study was approved by the *Comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé de l'Université de Montréal*.

2.2- Procedure

Each class was randomly assigned to one of three conditions: neuromotor training group (NM), aerobic training group (AE), and control group (CT). After consents were obtained and the inclusion criteria were verified, the data included in the analysis corresponded to those of 20 children in the NM, 19 in the AE, and 15 in the CT (see Table 1). A session of collective and individual tests took place during school hours, evaluating aerobic capacity, motor abilities, and cognitive functions. After each participant completed the tests, the 10 week trainings began for the two experimental groups. This consisted in 30 minutes of exercise every school day during school hours, in addition to the regular physical education programme. After the 10 weeks, evaluations were repeated.

[Insert Table 1 here]

Exercise Intervention. All the exercise sessions were conducted in the class, during school hours. The kinesio­logist in our team (M.C.M.) elaborated the programmes and led one session per week, teachers led the training for their respective class the remaining week days. The neuromotor training aimed at developing motor qualities such as coordination, movement control, stability, agility, rhythm, and velocity. Activities followed a progression in difficulty and included yoga, imitation games, and several sequences of movements and displacements, with little to no aerobic demand and no cognitive stimulation. The aerobic training aimed at developing aerobic capacity with a progression toward high-intensity intermittent training (Gormley et al., 2008). The activities consisted in aerobic stepping and jogging in place, with minimal motor skill demand and no cognitive stimulation. A modified version of Children’s OMNI Perceived Exertion Scale (Robertson et al., 2005) was used to assess intensity in each group (French translation with figures for each rating). The NM group received the instruction to stay under the third level “*Very Easy*”, while the AE group had to reach levels from 6 “*Panting*” to 10 “*Exhausting*”. The control group followed the regular physical education programme.

Assessment of aerobic capacity and motor abilities. All the physical tests were completed before and after the training and were selected from validated batteries. The

aerobic capacity test was the only physical test conducted collectively; tests of motor abilities were completed individually. The tests included:

Aerobic Capacity: 20 Meters Shuttle Run Test (Olds, Tomkinson, Léger, & Cazorla, 2006). Participants were asked to run between 2 lines 20 meters apart, following a pre-recorded pace set by an auditory tone. The initial velocity was 8.5 km/h and increased by 0.5 km/h every minute until exhaustion. The speed of the last stage completed (with a precision of 0.25 km/h) and the age of the participant were used in the equation of Leger et al. (1988) to calculate aerobic capacity.

Static Balance: Flamingo Balance Test (Monyeki et al., 2005). Part of the Eurofit Testing Battery, this task measures general balance. Participants had 15 trials to stay 60 seconds in balance on a beam (3cm wide), with their preferred leg. Maximum time in balance was the score, 60 seconds being the highest.

Dynamic Balance: Zigzag Hopping (Haga, 2008). Part of the Movement ABC battery, this task measures dynamic balance. Participants had to jump on six squares (30cm x 30cm) placed in a zigzag on the floor, without hopping twice on the same square or overstepping the side of the squares. Two trials were permitted for each leg to achieve one good trial and best time was kept for the analysis.

Speed and Coordination: Tapping Test (Monyeki et al., 2005). Part of the Eurofit Testing Battery, this task assesses the speed and the coordination of superior limb movement. Two rectangles are placed 60 cm apart on a table, with a circle equidistant between the rectangles. Sitting at the table, participants had to touch the two rectangles back and forth 25 times with one hand, whilst their other hand remained still on the circle. The outcome measure was the best time achieved with the fastest hand.

Digital Motor Control: Grooved Pegboard (Levine, Miller, Becker, Selnes, & Cohen, 2004). This task measures complex visual-motor coordination. Participants were asked to insert pegs in a board by carefully matching the orientation of the pegs with the grooves. Participants completed the board entirely with each hand. The dependent measure was the fastest time achieved.

Assessment of cognitive functions. Before and after the 10 week trainings, each participant completed an assessment of cognitive abilities. Tests were chosen based on two

specific criteria: the cognitive function assessed and the brain regions associated with performance of the task. There were two versions of each test, except for the test of intellectual quotient (IQ) completed only before the beginning of the programme to assure that the three groups were comparable at the outset of the study. The IQ test was the only cognitive test conducted collectively; other cognitive tests were completed individually.

Intelligence Quotient: Naglieri Nonverbal Ability Test (Naglieri & Ronning, 2000). This test measures general nonverbal abilities with progressive matrix items that use shapes and geometric designs combined with a spatial or logical organization. Participants had to identify the missing component of each matrix by choosing between five options. The number of good answers was used as the dependent measure.

Long-term memory: Rey Auditory Verbal Learning Test (RAVLT), related to temporal lobes (Saykin et al., 1999). This task assesses verbal learning and long-term memory. Participants had to listen and recall a 15-word list five times. The total number of correct items recalled in these five trials provided a measure of learning (first dependent measure). Afterwards, participants had to listen and recall a new 15-word list, and after that, recall the first 15-word list without hearing it. Thirty minutes later, participants were asked to recall the first list without hearing it to provide a measure of long-term memory (second dependent measure).

Executive Functions: Backward Digit Span, related to fronto-cerebellar circuit (Gerton et al., 2004). Part of the Wechsler Intelligence Scale for Children, this task assesses verbal working memory. Participants had to listen to a list of digits and repeat it in reverse sequence until they failed two trials of the same digit span. The number of correct recalled trials corresponded to the score.

Executive Functions: Verbal Fluency, related to fronto-cerebellar circuit (Schlösser et al., 1998). Part of the D-Kefs battery, this test measures the lexical access to words. Participants had 60 seconds to name as many words as possible beginning by a given letter. The number of correct words named during the three trials corresponded to the score.

Executive Functions: Verb Generation, related to fronto-cerebellar circuit (Raichle et al., 1994). This test assesses verbal associations and lexical access. Participants

were asked to generate a verb related to a given noun, answering to “what does it do?” or “what is it used for?” Score for the 40 noun list and mean time to give an answer were used in the statistical analysis.

2.3- Statistical analyses

A series of Analyses of Variance (ANOVAs) were performed for each dependant variable with group (three levels: NM, AE and CT) as the between subject variable and time (two levels: pre- and post-intervention) as the within subject factor. All significant group x time interactions were analysed with a series of planned comparisons based on our *a priori* hypotheses. Specifically, Student’s *t*-test, simple ANOVAs and Tukey’s (HSD) with appropriate alpha corrections determined if performance changed following the intervention. Effect sizes were computed as Cohen’s *d* values. All statistical analyses were conducted using SPSS 16.0 French for Windows.

3- Results

Before the beginning of the intervention, all subjects in each of the three groups had comparable results on the Naglieri measure of IQ, $F_{(2,51)} = 1.803, p > 0.05$ (see Table 2).

Table 3 presents the results for aerobic capacity and motor abilities. A significant time x group interaction was found for the 20 meters shuttle run test, $F_{(2,51)} = 9.772, p < 0.001, \eta^2 = 0.277$. Tests of simple effects revealed that AE improved significantly more than the two other groups, $F_{(2,51)} = 10.007, p < 0.001$. For Flamingo balance test, a marginal time x group interaction was observed, $F_{(2,51)} = 2.958, p = 0.061, \eta^2 = 0.104$. This marginally significant result motivated us to conduct further analyses that revealed a significant improvement for NM, $t_{(19)} = 2.253, p < 0.05$. There were no significant effects for the Grooved Pegboard ($p > 0.05$), the zigzag hopping, ($p > 0.05$), and the tapping test ($p > 0.05$). These results indicate that the group that underwent the aerobic training specifically improved their aerobic capacity whilst the group that underwent the motor training improved their balance. No other changes were found for any of the other physical tests.

Table 4 presents the results for the cognitive tests. For the RAVLT, there was no significant time x group interaction for sum of the 5 first trials recalls and delayed recall ($p>0.05$). There was also no significant interaction for the Backward Digit Span ($p>0.05$). The analyses of the verbal fluency scores showed a significant time x group interaction, $F_{(2,51)} = 10.086$, $p<0.05$, $\eta^2=0.283$, with significant improvement for NM, $t_{(19)} = 2.264$, $p<0.05$, and a nearly significant improvement for AE, $t_{(18)} = 2.035$, $p=0.057$. For the verb generation task, although there was no significant time x group interaction for the total number of items reported ($p>0.05$), there was a marginal time x group interaction for mean time, $F_{(2,51)} = 3.070$, $p=0.055$, $\eta^2=0.107$. This motivated us to conduct tests of simple effects, and comparisons showed a trend for NM to answer more rapidly after the intervention compared to CT ($p=0.047$), with no such tendency for AE ($p>0.50$). These results indicate that post-intervention changes were found for the verbal fluency task and the verb generation task. Specifically, the neuromotor group improved on the verbal fluency task and showed a tendency to answer more quickly on the verb generation task. The aerobic group showed a marginal improvement on the verbal fluency task. No other changes were found for any of the other cognitive measures.

[Insert Tables 2, 3 and 4 here]

Tables 5 and 6 present correlation analyses for the significant findings on the physical (aerobic capacity and motor abilities) and cognitive tests for each of the two experimental groups. For the aerobic group, there was no significant correlation between the VO_2 max and verbal fluency. Likewise, for the neuromotor group, there was no significant correlation between stability and verbal fluency. This indicates that the results on the physical and the cognitive tests do not co-vary.

[Insert Tables 5 and 6 here]

4- Discussion

The present study attempted to clarify possible effects of two different trainings on cognitive functioning in children. Our results showed differential improvements in executive functions induced by both neuromotor and aerobic training. Neuromotor training led to a significant improvement in verbal fluency and children in this group showed a tendency to answer more quickly on the verb generation task ($p = 0.068$). Aerobic training did not lead to any significant effect, although a marginal improvement was observed for verbal fluency ($p = 0.057$). We also observed different physical changes after the 10-week programmes; aerobic training significantly increased aerobic capacity and neuromotor training significantly improved balance. This strongly suggests that physical adaptations induced by each training were specific to the activities.

The intensity of the physical exercise programmes was controlled by asking the children to maintain a level of exertion using the Children's OMNI Perceived Exertion Scale that remained under the third level "*Very Easy*" for the NM group and within levels 6 "*Panting*" to 10 "*Exhausting*" for the AE group. It could be argued that heart rate monitoring would have provided a more objective method to control for the intensity of the physical exertion. However, it has been demonstrated that children between 8 and 12 years of age have the ability to estimate and produce specific intensities guided by their sense of effort (Gros Lambert, 2006) and that using scales adapted for children increases the validity of the perceived exertion in relation to exercise intensity and level of exhaustion (Coquart, Lensel, & Garcin, 2008). Moreover, the significant increase in aerobic capacity observed only for the AE group suggests that training intensities were specific enough to induce related physiological adaptations.

Our first hypothesis was supported by our results: children participating in the neuromotor training improved some aspects of executive functions associated to prefrontal cortex with no change for tasks associated with other cognitive domains. Although the available literature on the effects of motor training on cognition suggests an amelioration of executive functions, the results are difficult to interpret because the interventions included more than just motor activities. Manjunath and Telles (2001) observed an improvement in planning after yoga, but the training also included meditation and relaxation. McCormick

and Schnobrich (1971) showed an improvement in visual and auditory attention spans in children who followed a perceptual-motor training. However, because their programme also included activities that stimulated attention, the sources of the improvements are still uncertain.

The neurological circuit between the cerebellum and the dorsolateral prefrontal cortex underlies the interpretation of our results by the link that it makes between motor functions and cognitive abilities. More recent neuroimaging studies support this link by the interrelation between the cerebellum, with specification on left cerebellum, and the dorsolateral prefrontal cortex: neuronal projections from the left dentate gyrus of the cerebellum to dorsolateral prefrontal cortex were identified using functional connectivity magnetic resonance imaging (Allen et al., 2005).

The children in the NM group showed an upward trend in their mean time on the verb generation task compared to AE and CT groups, without any change in their accuracy score. An opposite pattern of performance was observed in patients with cerebellar atrophy who showed longer response times than healthy controls for an equal number of good answers (Richter et al., 2004). Moreover, using functional magnetic resonance imaging, Seger, Desmond, Glover, and Gabrieli (2000) observed an increase in the activation of the right cerebellum when subjects had to make difficult semantic associations on the verb generation task.

We also found a significant improvement on the verbal fluency test after the neuromotor training. Gauthier, Duyme, Zanca, and Capron (2009) investigated the neural correlates of verbal fluency and found bilateral activation in the cerebellum and in the dorsolateral prefrontal cortex. Furthermore, they observed that a greater activation of the left cerebellum was associated with a better performance on the task. This improvement could be related to the cerebellum's involvement in response time (Martin et al., 2006), as observed in the verb generation task. In this test, children had to generate a maximum number of words in one minute. Consequently, it is possible that the improvement in performance is related to an augmentation in the speed to access words. Together these findings lead us to speculate that the stimulation of the cerebellum, via a series of motor

activities, enhances its overall level of functioning and improves its contribution to cognitive tasks.

Surprisingly, no changes were observed for the backward digit span, a task known to activate the dorsolateral prefrontal cortex and cerebellum (Gerton et al., 2004). However, O'Hare, Lu, Houston, Bookheimer and Sowell (2008) found an increase in cerebellar activation in response to increasing working memory load only in adolescents and adults. This suggests that the cerebellum's implication in verbal working memory may appear in children older than the participants included in the present study.

No changes in long-term memory were observed after neuromotor training. This result was difficult to predict because the fronto-cerebellar circuit is not associated with memory function and no study investigated the effects of neuromotor training on memory in humans. Yet, animals that experienced an enriched environment showed improvements for spatial memory (Anderson et al., 2000; Harburger et al., 2007; Leggio et al., 2005; Henriette van Praag et al., 2005). Moreover, neuroanatomical changes in brain regions associated to memory were found in animals who experienced an enriched environment (Black et al., 1990; H. van Praag et al., 1999). Thus, our results suggest that neuromotor training do not affect brain regions related to memory in human.

Our second hypothesis of general effects of aerobic training on cognitive functioning was not supported by our results. No significant changes were observed for executive functions or long-term memory. However, a marginal improvement was observed for verbal fluency, an aspect of executive functions. This is consistent with the results of Davis et al. (2007) that indicate a positive effect of aerobic exercise on the Planning scale of the Cognitive Assessment System.

Pereira et al. (2007) observed that aerobic exercise increased cerebral blood volume and neurogenesis in the hippocampus of animals along with an improvement on the first recall, the sum of 5 first trials and the delayed recall of the Rey auditory verbal learning test performance in human adults. They correlated these observations in mice and in humans to propose that the effects of exercise on cognition are consequent to neurogenesis in the hippocampus. Moreover, as presented in the Introduction, Fabre et al. (2002) showed an improvement in memory in the elderly after aerobic exercise. According to these

observations, the lack of improvement for long-term memory in our study is surprising. One possible explanation for this discrepancy is that the aging brain may benefit more from physical activity than the developing brain.

One possible explanation for the effect of aerobic training on verbal fluency is the specific adaptations in the cerebellum and frontal cortex that are associated with aerobic exercise. Accordingly, studies that investigated the effects of aerobic exercise in the rodent brain report angiogenesis in cerebellum (Black et al., 1990), increased cytochrome oxidase in cerebellar lobules (Garifoli, Cardile, Maci, & Perciavalle, 2003), and increased norepinephrine turnover and release in frontal cortex (Dunn, Reigle, Youngstedt, Armstrong, & Dishman, 1996).

Acknowledgement

This research was funded by a CFI grant to DE. Part of the results were presented at the annual congress of the Canadian Psychology Association.

References

- Allen, G., McColl, R., Barnard, H., Ringe, W. K., Fleckenstein, J., & Cullum, C. M. (2005). Magnetic resonance imaging of cerebellar-prefrontal and cerebellar-parietal functional connectivity. *NeuroImage*, *28*(1), 39-48.
- Anderson, B. J., Li, X., Alcantara, A. A., Isaacs, K. R., Black, J. E., & Greenough, W. T. (1994). Glial hypertrophy is associated with synaptogenesis following motor-skill learning, but not with angiogenesis following exercise. *GLIA*, *11*(1), 73-80.
- Anderson, B. J., Rapp, D. N., Baek, D. H., McCloskey, D. P., Coburn-Litvak, P. S., & Robinson, J. K. (2000). Exercise influences spatial learning in the radial arm maze. *Physiology & behavior*, *70*(5), 425-429.
- Berman, K. F., Ostrem, J. L., Randolph, C., Gold, J., Goldberg, T. E., Coppola, R., et al. (1995). Physiological activation of a cortical network during performance of the Wisconsin Card Sorting Test: a positron emission tomography study. *Neuropsychologia*, *33*(8), 1027-1046.
- Black, J. E., Isaacs, K. R., Anderson, B. J., Alcantara, A. A., & Greenough, W. T. (1990). Learning causes synaptogenesis, whereas motor activity causes angiogenesis, in cerebellar cortex of adult rats. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *87*(14), 5568-5572.

- Burns, Y., O'Callaghan, M., McDonnell, B., & Rogers, Y. (2004). Movement and motor development in ELBW infants at 1 year is related to cognitive and motor abilities at 4 years. *Early Human Development*, *80*(1), 19-29.
- Coquart, J. B. J., Lensele, G., & Garcin, M. (2008). Perception de l'effort chez l'enfant et l'adolescent : mesure et intérêts. *Science & Sports, In Press, Corrected Proof*.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., Boyle, C. A., Waller, J. L., Miller, P. H., Naglieri, J. A., et al. (2007). Effects of aerobic exercise on overweight children's cognitive functioning: a randomized controlled trial. *Research quarterly for exercise and sport*, *78*(5), 510-519.
- Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child development*, *71*(1), 44-56.
- Doyon, J., Song, A. W., Karni, A., Lalonde, F., Adams, M. M., & Ungerleider, L. G. (2002). Experience-dependent changes in cerebellar contributions to motor sequence learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*(2), 1017-1022.
- Dunn, A. L., Reigle, T. G., Youngstedt, S. D., Armstrong, R. B., & Dishman, R. K. (1996). Brain norepinephrine and metabolites after treadmill training and wheel running in rats. *Medicine and science in sports and exercise*, *28*(2), 204-209.
- Fabre, C., Chamari, K., Mucci, P., Massé-Biron, J., & Préfaut, C. (2002). Improvement of cognitive function by mental and/or individualized aerobic training in healthy elderly subjects. *International journal of sports medicine*, *23*(6), 415-421.
- Garifoli, A., Cardile, V., Maci, T., & Perciavalle, V. (2003). Exercise increases cytochrome oxidase activity in specific cerebellar areas of the rat. *Archives italiennes de biologie*, *141*(4), 181-187.
- Gauthier, C. T., Duyme, M., Zanca, M., & Capron, C. (2009). Sex and performance level effects on brain activation during a verbal fluency task: a functional magnetic resonance imaging study. *Cortex*, *45*(2), 164-176.
- Gerton, B. K., Brown, T. T., Meyer-Lindenberg, A., Kohn, P., Holt, J. L., Olsen, R. K., et al. (2004). Shared and distinct neurophysiological components of the digits forward and backward tasks as revealed by functional neuroimaging. *Neuropsychologia*, *42*(13), 1781-1787.
- Gormley, S. E., Swain, D. P., High, R., Spina, R. J., Dowling, E. A., Kotipalli, U. S., et al. (2008). Effect of intensity of aerobic training on VO₂max. *Medicine and science in sports and exercise*, *40*(7), 1336-1343.
- Gornicka-Pawlak, E., Jabłońska, A., Chyliński, A., & Domańska-Janik, K. (2009). Housing conditions influence motor functions and exploratory behavior following focal damage of the rat brain. *Acta neurobiologiae experimentalis*, *69*(1), 62-72.
- Groslambert. (2006). Perceived Exertion: Influence of Age and Cognitive Development. *Sports Medicine*, *36*(11), 911-928.
- Haga, M. (2008). The relationship between physical fitness and motor competence in children. *Child care, health and development*, *34*(3), 329-334.
- Harburger, L. L., Lambert, T. J., & Frick, K. M. (2007). Age-dependent effects of environmental enrichment on spatial reference memory in male mice. *Behavioural Brain Research*, *185*(1), 43-48.

- Hayter, A. L., Langdon, D. W., & Ramnani, N. (2007). Cerebellar contributions to working memory. *NeuroImage*, *36*(3), 943-954.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature reviews. Neuroscience*, *9*(1), 58-65.
- Kephart, N. C. (Ed.). (1960). *The slow learner in the classroom*: Charles E. Merrill Publishing Company.
- Kleim, J. A., Markham, J. A., Vij, K., Freese, J. L., Ballard, D. H., & Greenough, W. T. (2007). Motor learning induces astrocytic hypertrophy in the cerebellar cortex. *Behavioural Brain Research*, *178*(2), 244-249.
- Knight, D., & Rizzuto, T. (1993). Relations for children in grades 2, 3, and 4 between balance skills and academic achievement. *Perceptual and motor skills*, *76*(3 Pt 2), 1296-1298.
- 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.
- Leggio, M. G., Mandolesi, L., Federico, F., Spirito, F., Ricci, B., Gelfo, F., et al. (2005). Environmental enrichment promotes improved spatial abilities and enhanced dendritic growth in the rat. *Behavioural Brain Research*, *163*(1), 78-90.
- Levine, A. J., Miller, E. N., Becker, J. T., Selnes, O. A., & Cohen, B. A. (2004). Normative data for determining significance of test-retest differences on eight common neuropsychological instruments. *The clinical neuropsychologist*, *18*(3), 373-384.
- Manjunath, N. K., & Telles, S. (2001). Improved performance in the Tower of London test following yoga. *Indian journal of physiology and pharmacology*, *45*(3), 351-354.
- Martin, T., Houck, J. M., Bish, J. P., Kicic, D., Woddruff, C. C., Moses, S. N., et al. (2006). MEG Reveals Different Contributions of Somatomotor Cortex and Cerebellum to Simple Reaction Time After Temporally Structured Cues. *Human Brain Mapping*, *27*, 552-561.
- Masley, S., Roetzheim, R., & Gualtieri, T. (2009). Aerobic exercise enhances cognitive flexibility. *Journal of clinical psychology in medical settings*, *16*(2), 186-193.
- McCormick, C. C., & Schnobrich, J. N. (1971). Perceptual-motor training and improvement in concentration in a Montessori preschool. *Perceptual and motor skills*, *32*(1), 71-77.
- Monyeki, M. A., Koppes, L. L. J., Kemper, H. C. G., Monyeki, K. D., Toriola, A. L., Pienaar, A. E., et al. (2005). Body composition and physical fitness of undernourished South African rural primary school children. *European journal of clinical nutrition*, *59*(7), 877-883.
- Morton, S. M., & Bastian, A. J. (2006). Cerebellar contributions to locomotor adaptations during splitbelt treadmill walking. *The Journal of Neuroscience*, *26*(36), 9107-9116.
- Naglieri, J. A., & Ronning, M. E. (2000). Comparison of white, African American, Hispanic, and Asian children on the Naglieri Nonverbal Ability Test. *Psychological assessment*, *12*(3), 328-334.
- O'Connor, C. (1969). Effects of selected physical activities upon motor performance, perceptual performance and academic achievement of first graders. *Perceptual and motor skills*, *29*(3), 703-709.

- O'Hare, E. D., Lu, L. H., Houston, S. M., Bookheimer, S. Y., & Sowell, E. R. (2008). Neurodevelopmental changes in verbal working memory load-dependency: an fMRI investigation. *NeuroImage*, *42*(4), 1678-1685.
- Olds, T., Tomkinson, G., Léger, L., & Cazorla, G. (2006). Worldwide variation in the performance of children and adolescents: an analysis of 109 studies of the 20-m shuttle run test in 37 countries. *Journal of sports sciences*, *24*(10), 1025-1038.
- Pereira, A. C., Huddleston, D. E., Brickman, A. M., Sosunov, A. A., Hen, R., McKhann, G. M., et al. (2007). An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(13), 5638-5643.
- Raichle, M. E., Fiez, J. A., Videen, T. O., MacLeod, A. M., Pardo, J. V., Fox, P. T., et al. (1994). Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cerebral Cortex*, *4*(1), 8-26.
- Reynolds, D., Nicolson, R. I., & Hambly, H. (2003). Evaluation of an exercise-based treatment for children with reading difficulties. *Dyslexia*, *9*(1), 48-71; discussion 46.
- Richter, S., Kaiser, O., Hein-Kropp, C., Dimitrova, A., Gizewski, E., Beck, A., et al. (2004). Preserved verb generation in patients with cerebellar atrophy. *Neuropsychologia*, *42*(9), 1235-1246.
- Robertson, R. J., Goss, F. L., Andreacci, J. L., Dubé, J. J., Rutkowski, J. J., Snee, B. M., et al. (2005). Validation of the children's OMNI RPE scale for stepping exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, *37*(2), 290-298.
- Rose, F. D., Love, S., & Dell, P. A. (1986). Differential reinforcement effects in rats reared in enriched and impoverished environments. *Physiology & behavior*, *36*(6), 1139-1145.
- Saykin, A. J., Johnson, S. C., Flashman, L. A., McAllister, T. W., Sparling, M., Darcey, T. M., et al. (1999). Functional differentiation of medial temporal and frontal regions involved in processing novel and familiar words: an fMRI study. *Brain*, *122* (Pt 10), 1963-1971.
- Schlösser, R., Hutchinson, M., Joseffer, S., Rusinek, H., Saarimaki, A., Stevenson, J., et al. (1998). Functional magnetic resonance imaging of human brain activity in a verbal fluency task. *Journal of neurology, neurosurgery and psychiatry*, *64*(4), 492-498.
- Seger, C. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (2000). Functional magnetic resonance imaging evidence for right-hemisphere involvement in processing unusual semantic relationships. *Neuropsychology*, *14*(3), 361-369.
- Smiley-Oyen, A. L., Lowry, K. A., Francois, S. J., Kohut, M. L., & Ekkekakis, P. (2008). Exercise, fitness, and neurocognitive function in older adults: the "selective improvement" and "cardiovascular fitness" hypotheses. *Annals of behavioral medicine*, *36*(3), 280-291.
- Stroth, S., Hille, K., Spitzer, M., & Reinhardt, R. (2009). Aerobic endurance exercise benefits memory and affect in young adults. *Neuropsychological Rehabilitation*, *19*(2), 223-243.
- Stuss, D. T., & Knight, R. T. (Eds.). (2002). *Principles of frontal lobe function*: Oxford University Press.

- 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.
- Van de Weerd, H., Aarsen, E., Mulder, A., Kruitwagen, C. L. J. J., Hendriksen, C. F. M., & Baumans, V. (2002). Effects of environmental enrichment for mice: variation in experimental results. *Journal of applied animal welfare science*, 5(2), 87-109.
- Van de Weerd, H. A., Van Loo, P. L., Van Zutphen, L. F., Koolhaas, J. M., & Baumans, V. (1997). Nesting material as environmental enrichment has no adverse effects on behavior and physiology of laboratory mice. *Physiology & behavior*, 62(5), 1019-1028.
- van Praag, H., Kempermann, G., & Gage, F. H. (1999). Running increases cell proliferation and neurogenesis in the adult mouse dentate gyrus. *Nature neuroscience*, 2(3), 266-270.
- van Praag, H., Shubert, T., Zhao, C., & Gage, F. H. (2005). Exercise enhances learning and hippocampal neurogenesis in aged mice. *The journal of neuroscience*, 25(38), 8680-8685.

Table 1

Participants

	NM	AE	CT	All
Number				
Total	20	19	15	54
Boys	8	10	8	26
Girls	12	9	7	28
Age (years)	11.45	11.26	11.50	11.40
NM = Neuromoteur AE = Aerobic CT = Control				

Table 2

Performance Scores for Intellectual Quotient

NM		AE		CT	
Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
25.97	1.31	25.22	0.59	28.14	1.17
$F_{(2,51)} = 1.80, p > .05$					
NM=Neuromotor AE=Aerobic CT=Control SD = Standard deviation					

Table 3

Performance Scores for Aerobic Capacity and Motor Abilities

	Pre-intervention		Post-intervention		^a Interaction effect
	Mean	SD	Mean	SD	<i>p</i>
VO ₂ (ml/kg*min)					
NM	46.64	0.75	44.51	1.01	.02*
AE	44.87	0.63	46.50	0.76	
CT	45.83	0.63	46.92	0.92	
Flamingo balance test (sec)					
NM	46.62	4.28	56.21	1.33	.06
AE	37.85	4.79	39.09	4.28	
CT	48.99	4.02	43.66	4.93	
Zigzag hopping (sec)					
NM	3.17	0.12	3.08	0.12	.41
AE	4.01	0.28	3.67	0.10	
CT	3.27	0.12	3.36	0.05	
Tapping test (sec)					
NM	17.82	0.50	17.66	0.51	.94
AE	19.08	0.95	18.67	0.37	
CT	16.96	0.69	16.94	0.42	
Grooved pegboard (sec)					
NM	60.52	1.27	61.74	1.46	.07
AE	61.47	1.50	60.49	1.24	
CT	63.95	1.37	59.91	1.04	

^a interaction effect between time (pre- and post-intervention) and group (NM, AE and CT)

*significant interaction at $p < 0.05$

NM=Neuromotor AE=Aerobic CT=Control SD = Standard deviation sec = seconds

Table 4

Performance Scores for Cognitive Abilities

	Pre-intervention		Post-intervention		^a Interaction effect
	Mean	SD	Mean	SD	<i>p</i>
RAVLT Sum of 5 first trials recalls (words)					
NM	52.10	1.58	55.94	1.24	.30
AE	50.93	1.43	52.82	1.42	
CT	50.44	1.48	49.77	1.60	
RAVLT delayed recall (words)					
NM	12.68	0.39	11.89	0.30	.73
AE	11.97	0.29	11.52	0.32	
CT	12.26	0.63	11.30	0.54	
Backward digit span (words)					
NM	5.10	0.32	5.54	0.24	.51
AE	4.41	0.22	5.47	0.30	
CT	5.56	0.43	6.13	0.38	
Verbal fluency (words)					
NM	22.22	0.92	24.12	0.85	.00*
AE	17.38	1.44	19.21	1.00	
CT	24.71	2.16	19.89	1.05	
Verb generation score (words)					
NM	65.22	1.85	65.20	1.57	.87
AE	62.71	1.07	61.69	2.02	
CT	67.70	1.91	68.08	1.55	
Verb generation mean time for answer (sec)					
NM	2.71	0.20	2.36	0.11	.05
AE	2.85	0.12	2.55	0.14	
CT	2.49	0.19	2.85	0.18	

^a interaction effect between time (pre- and post-intervention) and group (NM, AE and CT)

*significant interaction at $p < 0.05$

NM=Neuromotor AE=Aerobic CT=Control SD = Standard deviation sec = seconds

Table 5

Correlation - Aerobic Group

		Verbal fluency
Aerobic Capacity	Pearson coefficient	-0.182
	Significance	0.456

Table 6

Correlations - Neuromotor Group

		Verbal fluency	Verb generation
Aerobic Capacity	Pearson coefficient	-0.182	0.309
	Significance	0.456	0.186

CHAPITRE 6 – DISCUSSION

La présente recherche visait à clarifier les effets de deux entraînements différents sur les fonctions cognitives chez l'enfant. Une amélioration significative de la fluence verbale et une tendance à être plus rapide lors de la génération de verbe ($p = 0,068$) ont été observées suite à 10 semaines d'entraînement neuromoteur. Après un entraînement aérobie, seule une amélioration marginale ($p = 0,057$) de la fluence verbale a été observée. Aucun effet n'a été observé pour la mémoire à long-terme suite aux deux entraînements. De plus, nous avons observé des changements physiques caractéristiques suite aux 10 semaines d'activités : l'entraînement aérobie a amélioré significativement la capacité aérobie maximale et l'entraînement neuromoteur a amélioré significativement l'équilibre. Ceci nous a permis de vérifier que chaque entraînement stimulait des habiletés et capacités physiques distinctes, et que les adaptations physiques induites par chacun ont été spécifiques aux activités pratiquées.

6.1 – LIMITES

La méthode utilisée afin de contrôler l'intensité de l'entraînement pourrait influencer l'interprétation de nos résultats. Dans notre intervention, nous avons utilisé une échelle de perception de l'effort correspondant à une identification subjective de l'intensité de l'exercice pratiqué. Sur une échelle de 10 niveaux d'effort, allant de «Aucun effort» à «Crevant», les enfants recevaient comme consigne d'atteindre des niveaux spécifiques. Contrairement à une mesure objective comme la fréquence cardiaque, l'utilisation de cette mesure subjective aurait pu mener à une stimulation inadéquate dans l'entraînement. Cependant, il a été démontré que les enfants de 8 à 12 ans possèdent la capacité d'estimer et d'atteindre des intensités d'exercice spécifiques grâce à leur perception d'effort (Gros Lambert, 2006). Il est aussi connu que l'utilisation d'échelles adaptées aux enfants augmente la validité de leur perception de l'effort associée à l'intensité de l'exercice et à l'identification du niveau de fatigue (Coquart, Lensele, & Garcin, 2008). Finalement, comme

les améliorations de la capacité aérobie maximale sont ressorties seulement pour le groupe AE, cela suggère que les intensités d'entraînement ont été suffisantes pour induire les adaptations physiologiques spécifiques. Ainsi, l'échelle de perception de l'effort semble être un outil adéquat, et son utilisation pour contrôler l'intensité d'entraînement ne semble pas avoir affecté nos résultats.

Outre cette limite, deux facteurs auraient pu influencer nos résultats. Le premier réfère aux effets possibles de l'entraînement sur la capacité d'attention et d'éveil. La participation des enfants aux activités physiques diverses auraient pu augmenter ces deux habiletés, et ainsi améliorer leurs performances cognitives. Par contre, si tel était le cas dans notre étude, les résultats auraient démontré des améliorations pour chacun des tests cognitifs complétés. Comme pour les améliorations aux tests physiques, les changements distincts observés dans les groupes entraînés démontrent que cet effet n'a pas influencé les résultats de notre étude. Le deuxième facteur est l'effet de pratique pour les évaluations neuropsychologiques. Comme les tests ont été complétés deux fois, les participants connaissaient les tests et certaines stratégies lors de la deuxième passation. Par contre, nous avons utilisé des versions différentes pour tous les tests lors de la deuxième évaluation. De plus, nous avons conduits les analyses statistiques sur les changements observés. Et, comme un groupe contrôle était inclus, les améliorations possibles conséquentes à la pratique ont été contrôlées avec ce type d'analyse.

6.2 – EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT NEUROMOTEUR

Notre première hypothèse a été supportée par nos résultats : les enfants participant à un entraînement neuromoteur ont amélioré certains aspects des fonctions exécutives reliées au circuit fronto-cérébelleux. Nos observations ont démontré une amélioration significative pour la fluence verbale et une amélioration marginale pour le temps de réponse lors de la génération de verbe suite à l'entraînement, sans changement pour la mémoire de travail et la mémoire à long-terme.

À notre connaissance, il s'agit de la première étude à conduire un entraînement neuromoteur sans stimulations cognitive ou aérobie, à en mesurer les effets sur les fonctions cognitives et à tenter d'expliquer les observations en lien avec un modèle neuropsychologique. Tel que présenté plus tôt, les autres études évaluant les effets d'un entraînement neuromoteur sur la cognition tendent à montrer un effet positif sur les fonctions exécutives. Par contre, comme plusieurs stimulations différentes étaient incluses dans les activités, les interprétations doivent être nuancées. Suite à une pratique de yoga, Manjunath et Telles (2001) ont observé une amélioration de la planification, mais les activités comprenaient de la méditation, des chants et de la relaxation. Conséquemment à ces diverses stimulations, les auteurs discutent de leurs observations en reliant l'implication du cortex préfrontal dans la tâche de la Tour de Londres et dans la méditation. L'autre étude qui a inclus une mesure des habiletés cognitives a montré une amélioration des empan attentionnels visuel et auditif suite à un entraînement perceptivo-moteur (McCormick & Schnobrich, 1971). Les auteurs ont discuté de leurs résultats en se concentrant sur l'attention, par contre, les tests qu'ils ont utilisés correspondaient à des mesures de la mémoire de travail, une fonction cognitive associée aux lobes frontaux (Henson & Fletcher, 2001). Ainsi, la contribution motrice de l'entraînement perceptivo-moteur aurait pu bénéficier à cette fonction exécutive. Cependant, comme les activités incluaient une stimulation cognitive, les sources des améliorations restent incertaines. Ainsi, dans notre étude, il était essentiel d'éviter toute stimulation cognitive dans les activités pour déterminer clairement les sources des changements observés. De cette façon, nous avons identifié l'entraînement neuromoteur comme déterminant des améliorations exécutives chez l'enfant.

Le circuit neurologique décrit plus tôt est à la base de l'interprétation de nos résultats grâce au lien fait entre la fonction motrice et les habiletés cognitives. Des études récentes en neuroimagerie supportent ce lien grâce à l'interrelation entre le cervelet et le cortex préfrontal dorsolatéral. Allen et al. (2005) ont identifié des projections nerveuses allant du noyau dentelé gauche du cervelet vers le cortex préfrontal dorsolatéral en utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. De plus, les deux côtés du cervelet ont

été activés lors de tâches d'apprentissage de mouvements et d'exécutions motrices (Lacourse, Orr, Cramer, & Cohen, 2005; Matsumura et al., 2004). Ces études supportent donc le modèle proposé par Diamond (2000) du circuit fronto-cérébelleux, avec une précision sur le lien entre le cervelet gauche et le cortex préfrontal dorsolatéral.

Au test de la génération de verbe, les enfants du groupe NM n'ont démontré aucun changement de pointage, c'est-à-dire qu'ils n'étaient pas meilleurs pour générer des bonnes réponses. Par contre, les enfants de ce groupe étaient distinctement plus rapides pour répondre à chaque essai comparativement aux groupes AE et CT. Un résultat opposé a été observé dans des cas d'atrophie cérébelleuse : les sujets atteints démontraient des temps de réaction et de réponse plus lents que les sujets sains pour générer les verbes, pour un nombre égal de bonnes réponses (Richter et al., 2004). De plus, en utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle lors de la performance de cette tâche, Seger, Desmond, Glover et Gabrieli (2000) ont observé une activation du cervelet droit lorsque les sujets devaient associer des items avec une sémantique semblable. Lorsque les items présentaient une sémantique divergente, correspondant à un niveau plus difficile dans la génération de la réponse, une activation bilatérale était observée. Ils ont donc proposé que le cervelet est plus actif lorsque la tâche est plus difficile. Il s'agirait d'une augmentation de l'activation du cervelet gauche lorsqu'une réflexion plus grande est nécessaire à la production d'une réponse appropriée.

Gauthier, Duyme, Zanca et Capron (2009) ont décrit les régions activées lors de la performance d'un test de fluence verbale. Des régions sollicitées, une activation bilatérale du cervelet et du cortex préfrontal dorsolatéral gauche est ressortie. De plus, ils ont observé qu'une plus grande activation du cortex cingulaire antérieur et du cervelet gauche était associée à une meilleure performance. Ceci supporte donc la participation du cervelet dans la performance à ce test et l'implication de cette structure dans l'amélioration significative de la fluence verbale pour les enfants ayant participé à l'entraînement neuromoteur. Cette amélioration pourrait aussi être expliquée par la participation du cervelet dans le temps de réponse (Martin et al., 2006). Lors de ce test, les enfants devaient générer un maximum de mots en une minute. Ainsi, l'amélioration de performance pourrait être conséquente à une

augmentation de la rapidité d'extraction des mots, plutôt qu'à une amélioration de l'habileté de génération de mots. Ces observations sont en lien avec l'amélioration du temps de réponse observée au test de génération de verbes. La stimulation motrice du cervelet aurait donc mené à l'amélioration de son implication lors de la génération de mots, se traduisant par une tendance à diminuer le temps de réponse chez les enfants du groupe NM.

Étonnamment, aucun changement n'a été observé pour le test d'empan de chiffre indirect, une tâche reconnue pour co-activer le cortex préfrontal dorsolatéral et le cervelet (Gerton et al., 2004). Cependant, O'Hare, Lu, Houston, Bookheimer et Sowell (2008) ont étudié les changements neurodéveloppementaux de la capacité de mémoire de travail verbale chez les enfants, les adolescents et les adultes. Ils ont observé une augmentation de l'activation du cervelet parallèlement à l'augmentation de l'empan de mémoire de travail exigée par la tâche seulement chez les adolescents et les adultes. Ceci suggère donc que l'implication du cervelet dans la mémoire de travail verbale se développe entre l'enfance et l'adolescence. Comme nos sujets se situaient entre ces deux stades de développement, une implication minimale du cervelet dans la performance du test d'empan de chiffre indirect pourrait expliquer le manque d'effets de l'entraînement neuromoteur sur cette fonction exécutive.

Les effets de l'entraînement neuromoteur sur la mémoire à long-terme étaient difficiles à prévoir. Les études chez l'animal ont démontré des effets cognitifs positifs sur la mémoire contextuelle, tant suite à un entraînement moteur qu'à un entraînement aérobie (Anderson et al., 2000; Harburger et al., 2007; Leggio et al., 2005; Henriette van Praag et al., 2005). De plus, des changements neuroanatomiques positifs ont été observés dans des régions associées à la mémoire telles que le gyrus dentelé et l'hippocampe (Black et al., 1990; H. van Praag et al., 1999). Par contre, le circuit neurologique entre le cervelet et le cortex préfrontal dorsolatéral n'était pas associé à des fonctions mnésiques. Et, comme aucune autre étude n'a vérifié les effets de l'entraînement neuromoteur sur les fonctions de mémoire chez l'humain, il était difficile de s'attendre à des effets spécifiques. Ainsi, notre étude étant la première à vérifier les effets potentiels de l'entraînement neuromoteur, nos

résultats suggèrent que cet entraînement n'affecte pas les régions du cerveau associées à la mémoire.

Tel que mentionné dans l'introduction, les tâches exécutives évaluées dans cette présente recherche sont celles associées au circuit fronto-cérébelleux (i.e. les tâches cognitives qui sollicitent une co-activation du cervelet et du cortex préfrontal). Malgré la multitude de tâches exécutives identifiées au fil des années, notre hypothèse ne concernait que celles étant associées au cervelet, car il s'agit de la structure reliant le fonctionnement moteur aux processus cognitifs. Duncan et Owen (2000) ont combiné les résultats de plusieurs études pour lesquelles l'imagerie cérébrale a été utilisée lors de la performance à différentes tâches exécutives. Celles-ci incluaient des aspects de perception, de sélection de réponse, de contrôle exécutif, de mémoire de travail, de mémoire épisodique et de résolution de problème. Malgré qu'ils aient utilisé différentes tâches sollicitant des processus distincts, une régularité dans les régions activées est ressortie dans les lobes frontaux. Il s'agissait d'un réseau d'activation incluant les régions moyenne dorsolatérale, moyenne ventrolatérale et antérieure dorsale, alors que les autres régions du cortex frontal restaient insensibles. Leurs résultats suggèrent une forte spécialisation des régions frontales recrutées, mais associée à une grande variété de tâches. En plus de ces régions frontales, Collette, Hogge Salmon et Van Der Linden (2006) ont démontré que les fonctions exécutives sollicitaient plusieurs régions postérieures du cerveau. Ces auteurs ont combiné les résultats de plusieurs études de façon à identifier les régions activées par certaines catégories de fonctions exécutives. Ces catégories incluaient les capacités de mise à jour de l'information, de transfert de l'information, d'inhibition et de coordination lors de double tâche. Ainsi, outre les régions spécifiques des lobes frontaux, différentes activations ont été observées notamment dans les lobes temporaux, les lobes pariétaux et dans les régions sous-corticales. Ces observations supportent notre hypothèse que seules les tâches exécutives associées au cervelet ont été affectées par l'entraînement neuromoteur, car nous nous serions attendus à ce qu'un effet de l'entraînement sur le lobe frontal aurait affecté toutes les fonctions exécutives mesurées.

6.3 – EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT AÉROBIE

Notre seconde hypothèse, spécifiant des effets globaux de l'entraînement aérobic sur le fonctionnement cognitif, n'a pas été vérifiée. Aucun changement significatif n'a été observé pour les tests cognitifs, que ce soit pour les fonctions exécutives associées aux lobes frontaux ou les fonctions associées aux lobes temporaux. Cependant, une amélioration marginale a été observée pour la fonction exécutive de la fluence verbale.

Comme présentée plus tôt, l'étude de Davis et al. (2007) a démontré un effet positif de l'entraînement aérobic sur les fonctions exécutives, mesurées par l'échelle de Planification du *Cognitive Assessment System*. Ces résultats sont en accord avec les nôtres, mais ne permettent pas de conclure qu'un entraînement aérobic affecte les fonctions exécutives globalement. Comme décrit plus tôt, la batterie de tests utilisée dans cette étude sollicite les fonctions exécutives dans chacune de ses échelles. De plus, différents tests de fonctions exécutives ont été utilisés dans notre étude, et seule la fluence verbale a démontré une amélioration notable. Par conséquent, les effets de l'entraînement aérobic semblent affecter certaines tâches exécutives seulement.

En ce qui a trait à la mémoire à long-terme, le manque d'effets suite à l'entraînement aérobic dans notre étude est surprenant. Pereira et al. (2007) ont observé qu'un exercice aérobic augmentait le volume sanguin cérébral ainsi que la neurogénèse dans le gyrus dentelé de la souris entraînée. Ils ont effectué parallèlement un même type d'entraînement chez l'humain, et ont aussi observé une augmentation du volume sanguin cérébral ainsi qu'une amélioration du rappel immédiat du premier essai, de la somme des cinq rappels et du rappel différé au test des 15 mots de Rey. Ils ont corrélé ces améliorations chez l'animal et l'humain et ont proposé que l'effet de l'exercice sur la performance cognitive était conséquent à la neurogénèse dans l'hippocampe. De plus, comme présenté plus tôt, Fabre et al. (2002) ont démontré une amélioration de la mémoire verbale chez les aînés suite à un entraînement aérobic. Suite à ces observations, le manque de changement cognitif dans notre étude pour cette même habileté cognitive est surprenant. Une explication possible de ces divergences implique le déclin cognitif avec l'âge. Il a été démontré que des déficits de mémoire verbale peuvent être détectés dès l'âge adulte, plus

spécifiquement vers 50 ans (H. P. Davis et al., 2003). Ainsi, un cerveau âgé pourrait bénéficier davantage des effets de l'activité physique qu'un cerveau en développement. Ceci pourrait donc expliquer l'absence d'amélioration de la capacité de mémoire des enfants ayant participé à notre étude.

Comme l'entraînement aérobie ne sollicite pas les mêmes habiletés motrices que l'entraînement neuromoteur, le circuit fronto-cérébelleux discuté plus tôt ne constitue pas une explication possible des effets cognitifs observés. L'amélioration de la fluence verbale suite à l'entraînement aérobie, bien qu'elle ne soit pas significative, permet possiblement d'identifier un lien avec l'activité pratiquée. L'implication du cervelet et du cortex frontal dans cette tâche de génération de mots pourrait expliquer comment l'exercice aérobie affecte cette fonction (Whitney et al., 2009). Les résultats de plusieurs études conduites chez l'animal entraîné ont démontré des effets neurophysiologiques et neurobiologiques de l'exercice aérobie. L'angiogénèse dans le cervelet (Black et al., 1990) a été observé, correspondant à la formation de nouveaux vaisseaux sanguins. L'activité de la cytochrome oxydase, une protéine de la chaîne de transport des électrons impliquée dans la production d'énergie cellulaire, a été augmentée dans les lobules cérébelleux suite à l'entraînement (Garifoli, Cardile, Maci, & Perciavalle, 2003). Finalement, une augmentation de la sécrétion et de la durée d'activation neuronale de la norépinephrine dans le cortex frontal a été observée (Dunn, Reigle, Youngstedt, Armstrong, & Dishman, 1996). Ces mécanismes étant tous impliqués dans l'activation neuronale, la survie cellulaire et la plasticité synaptique (Parfenova & Leffler, 2008; Henriette van Praag, 2009), nous suggérons qu'ils sont à la base de l'influence positive de l'entraînement aérobie sur la performance au test de fluence verbale.

CONCLUSION

Pour la première fois, les effets d'un entraînement aérobic et d'un entraînement neuromoteur sur les fonctions cognitives ont été comparés. Nos résultats suggèrent que, chez l'enfant, les deux entraînements mènent à des améliorations différentes des fonctions exécutives. L'entraînement neuromoteur de dix semaines a affecté positivement des fonctions exécutives reliées au circuit fronto-cérébelleux, alors que l'entraînement aérobic a amélioré de façon marginale la fluence verbale.

Nos observations pourraient refléter une réorganisation neurologique consécutive à la demande physique spécifique à l'exercice pratiqué, c'est-à-dire l'amélioration des activations du cervelet en lien avec le cortex préfrontal dorsolatéral. Cependant, des recherches futures utilisant l'imagerie cérébrale seraient nécessaires pour vérifier si les changements cognitifs suite à l'entraînement sont provoqués par des changements dans l'activation nerveuse. En lien avec nos résultats, les études pourraient tenter de mesurer l'activation dans le cervelet et le cortex préfrontal dorsolatéral pour une même tâche, avant et après un entraînement neuromoteur. De plus, les mécanismes neurophysiologiques influençant la structure neuronale, la signalisation synaptique et la plasticité cérébrale pourraient être à la base de ces changements cognitifs. Certains mécanismes impliqués dans l'activation nerveuse ont été présentés dans ce mémoire comme étant conséquents à l'entraînement aérobic chez l'animal, c'est-à-dire l'angiogénèse, l'activité de la cytochrome oxydase et la sécrétion et la durée d'activation de la norépinéphrine. Ainsi, des recherches chez l'humain vérifiant ces différentes hypothèses seraient nécessaires pour comprendre clairement comment l'exercice affecte les mécanismes et fonctionnements du cerveau. Un protocole comme le nôtre, mais qui utilise des techniques d'imagerie cérébrale et des mesures de neurotransmetteurs pour effectuer les évaluations pré et post-intervention, pourrait permettre d'identifier si ces mécanismes ou fonctionnements sous-tendent les changements cognitifs observés. L'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle par exemple pourrait déceler des changements dans l'activation cérébrale et la consommation d'oxygène lors d'une même tâche avant et après l'entraînement. En ce qui a

trait aux mesures des neurotransmetteurs, une comparaison avec le modèle animal pourrait permettre d'avancer les connaissances, car les techniques sont encore limitées chez l'humain.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, G., McColl, R., Barnard, H., Ringe, W. K., Fleckenstein, J., & Cullum, C. M. (2005). Magnetic resonance imaging of cerebellar-prefrontal and cerebellar-parietal functional connectivity. *NeuroImage*, 28(1), 39-48.
- Anderson, B. J., Li, X., Alcantara, A. A., Isaacs, K. R., Black, J. E., & Greenough, W. T. (1994). Glial hypertrophy is associated with synaptogenesis following motor-skill learning, but not with angiogenesis following exercise. *GLIA*, 11(1), 73-80.
- Anderson, B. J., Rapp, D. N., Baek, D. H., McCloskey, D. P., Coburn-Litvak, P. S., & Robinson, J. K. (2000). Exercise influences spatial learning in the radial arm maze. *Physiology & behavior*, 70(5), 425-429.
- Aron, A. R., Dowson, J. H., Sahakian, B. J., & Robbins, T. W. (2003). Methylphenidate improves response inhibition in adults with attention deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 54, 1465-1468.
- Bailey, R. (2006). Physical Education and Sport in Schools: A Review of Benefits and Outcomes. *Journal of School Health*, 76(8), 397-401.
- Berman, K. F., Ostrem, J. L., Randolph, C., Gold, J., Goldberg, T. E., Coppola, R., et al. (1995). Physiological activation of a cortical network during performance of the Wisconsin Card Sorting Test: a positron emission tomography study. *Neuropsychologia*, 33(8), 1027-1046.
- Beunen, G., & Malina, R. M. (1988). Growth and physical performance relative to the timing of the adolescent spurt. *Exercise and Sport Sciences*, 16, 503-537.
- Black, J. E., Isaacs, K. R., Anderson, B. J., Alcantara, A. A., & Greenough, W. T. (1990). Learning causes synaptogenesis, whereas motor activity causes angiogenesis, in cerebellar cortex of adult rats. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(14), 5568-5572.
- Blumenthal. (1988). Effects of aerobic exercise training, age, and physical fitness on memory-search performance. *Psychology and aging*, 3(3), 280-285.
- Boni, S., Valle, G., Cioffi, R. P., Bonetti, M. G., Perrone, E., Tofani, A., et al. (1992). Crossed cerebello-cerebral diaschisis: a SPECT study. *Nuclear medicine communications*, 13(11), 824-831.

- Bouchard, C., Daw, E. W., Rice, T., Prusse, L., Gagnon, J., Province, M. A., et al. (1998). Familial resemblance for VO₂max in the sedentary state: the HERITAGE family study. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(2), 252-258.
- Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *NeuroImage*, 5, 49-62.
- Brocki, K. C., & Bohlin, G. (2004). Executive functions in children aged 6 to 13: a dimensional and developmental study. *Developmental neuropsychology*, 26(2), 571-593.
- 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.
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietraßyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P., & Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience Letters*, 441, 218-223.
- Casey, B. J., Castellanos, F. X., Giedd, J. N., Marsh, W. L., Hamburger, S. D., Schubert, A. B., et al. (1997). Implication of right frontostriatal circuitry in response inhibition and attention deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 36, 374-383.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2005). Tapping in synchrony to auditory rhythms. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1060, 400-403.
- Collette, F., Hogge, M., Salmon, E., & Van Der Linden, M. (2006). Exploration of the neural substrates of executive functioning by functional neuroimaging. *Neuroscience*, 139, 209-221.
- Conrad, C. D., & Roy, E. J. (1993). Selective loss of hippocampal granule cells following adrenalectomy: implications for spatial memory. *The journal of neuroscience*, 13(6), 2582-2590.
- Coquart, J. B. J., Lensele, G., & Garcin, M. (2008). Perception de l'effort chez l'enfant et l'adolescent : mesure et intérêts. *Science & Sports, In Press, Corrected Proof*.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., Boyle, C. A., Waller, J. L., Miller, P. H., Naglieri, J. A., et al. (2007). Effects of aerobic exercise on overweight children's cognitive functioning: a randomized controlled trial. *Research quarterly for exercise and sport*, 78(5), 510-519.

- Davis, H. P., Small, S. A., Stern, Y., Mayeux, R., Feldstein, S. N., & Keller, F. R. (2003). Acquisition, recall, and forgetting of verbal information in long-term memory by young, middle-aged, and elderly individuals. *Cortex*, 39(4-5), 1063-1091.
- de Zubicaray, G. I., Andrew, C., Zelaya, F. O., Williams, S. C. R., & Dumanoir, C. (2000). Motor response suppression and the prepotent tendency to respond: A parametric fMRI study. *Neuropsychologia*, 38, 1280-1291.
- Desmond, J. E., & Fiez, J. A. (1998). Neuroimaging studies of the cerebellum: language, learning and memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 355-361.
- Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child development*, 71(1), 44-56.
- Diedrichsen, J., Criscimagna-Hemminger, S. E., & Shadmehr, R. (2007). Dissociating timing and coordination as functions of the cerebellum. *The Journal of Neuroscience*, 27(23), 6291-6301.
- Doyon, J., Song, A. W., Karni, A., Lalonde, F., Adams, M. M., & Ungerleider, L. G. (2002). Experience-dependent changes in cerebellar contributions to motor sequence learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(2), 1017-1022.
- Duncan, J., & Owen, A. M. (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends in Neurosciences*, 23, 475-483.
- Dunn, A. L., Reigle, T. G., Youngstedt, S. D., Armstrong, R. B., & Dishman, R. K. (1996). Brain norepinephrine and metabolites after treadmill training and wheel running in rats. *Medicine and science in sports and exercise*, 28(2), 204-209.
- Fabre, C., Chamari, K., Mucci, P., Massé-Biron, J., & Préfaut, C. (2002). Improvement of cognitive function by mental and/or individualized aerobic training in healthy elderly subjects. *International journal of sports medicine*, 23(6), 415-421.
- Fox, P. T., Raichle, M. E., & Thach, W. T. (1984). Functional mapping of the human cerebellum with positron emission tomography. *Neurobiology*, 82, 7462-7466.
- Garifoli, A., Cardile, V., Maci, T., & Perciavalle, V. (2003). Exercise increases cytochrome oxidase activity in specific cerebellar areas of the rat. *Archives italiennes de biologie*, 141(4), 181-187.

- Gauthier, C. T., Duyme, M., Zanca, M., & Capron, C. (2009). Sex and performance level effects on brain activation during a verbal fluency task: a functional magnetic resonance imaging study. *Cortex*, *45*(2), 164-176.
- Gerton, B. K., Brown, T. T., Meyer-Lindenberg, A., Kohn, P., Holt, J. L., Olsen, R. K., et al. (2004). Shared and distinct neurophysiological components of the digits forward and backward tasks as revealed by functional neuroimaging. *Neuropsychologia*, *42*(13), 1781-1787.
- Gormley, S. E., Swain, D. P., High, R., Spina, R. J., Dowling, E. A., Kotipalli, U. S., et al. (2008). Effect of intensity of aerobic training on VO₂max. *Medicine and science in sports and exercise*, *40*(7), 1336-1343.
- Gornicka-Pawlak, E., Jabłońska, A., Chyliński, A., & Domańska-Janik, K. (2009). Housing conditions influence motor functions and exploratory behavior following focal damage of the rat brain. *Acta neurobiologiae experimentalis*, *69*(1), 62-72.
- Groslambert. (2006). Perceived Exertion: Influence of Age and Cognitive Development. *Sports Medicine*, *36*(11), 911-928.
- Haga, M. (2008). The relationship between physical fitness and motor competence in children. *Child care, health and development*, *34*(3), 329-334.
- Harburger, L. L., Lambert, T. J., & Frick, K. M. (2007). Age-dependent effects of environmental enrichment on spatial reference memory in male mice. *Behavioural Brain Research*, *185*(1), 43-48.
- Henson, R. N., & Fletcher, P. C. (2001). Frontal lobes and human memory: insights from functional neuroimaging. *Brain*, *124*(5), 849-881.
- 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., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature reviews. Neuroscience*, *9*(1), 58-65.
- Holmes, G. (1939). The cerebellum of man. *Brain*, *62*, 1-31.
- Isaacs, K. R., Anderson, B. J., Alcantara, A. A., Black, J. E., & Greenough, W. T. (1992). Exercise and the brain: angiogenesis in the adult rat cerebellum after vigorous physical activity and motor skill learning. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, *12*, 110-119.

- Jurg, M. E., Kremers, S. P. J., Candel, M. J. J. M., Van Der Wal, M. F., & De Meij, J. S. B. (2006). A controlled trial of a school-based environmental intervention to improve physical activity in Dutch children: JUMP-in, kids in motion. *Health Promotion International, 21*(4), 320-330.
- Kadesjo, B., & Gillberg, C. (1998). Attention deficits and clumsiness in Swedish 7-year-old children. *Developmental Medicine and Child Neurology, 40*, 796-804.
- Katanoda, K., Yoshikawa, K., & Sugishita, M. (2001). A functional MRI study of the neural substrates for writing. *Human Brain Mapping, 13*, 34-42.
- Kawashima, R., Okuda, J., Umetsu, A., Sugiura, M., Inoue, K., Suzuki, K., et al. (2000). Human cerebellum plays an important role in memory-timed finger movement: an fMRI study. *Journal of Neurophysiology, 83*, 1079-1087.
- Kelly, T. P., & Britton, P. G. (1996). Sex differences on an adaptation of the Digit Symbol subtest of the Wechsler Intelligence Scale for Children-III. *Perceptual and motor skills, 83*(3 Pt 1), 843-847.
- Kephart, N. C. (Ed.). (1960). *The slow learner in the classroom*: Charles E. Merrill Publishing Company.
- Kim, S. G., Uğurbil, K., & Strick, P. L. (1994). Activation of a cerebellar output nucleus during cognitive processing. *Science, 265*(5174), 949-951.
- Kleim, J. A., Markham, J. A., Vij, K., Freese, J. L., Ballard, D. H., & Greenough, W. T. (2007). Motor learning induces astrocytic hypertrophy in the cerebellar cortex. *Behavioural Brain Research, 178*(2), 244-249.
- Kleim, J. A., Swain, R. A., Armstrong, K. A., Napper, R. M., Jones, T. A., & Greenough, W. T. (1998). Selective synaptic plasticity within the cerebellar cortex following complex motor skill learning. *Neurobiology of learning and memory, 69*(3), 274-289.
- Klimkeit, E. I., Sheppard, D. M., Lee, P., & Bradshaw, J. L. (2004). Bimanual coordination deficits in attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *Neuropsychology, development, and cognition. Section A, Journal of clinical and experimental neuropsychology, 26*(8), 999-1010.
- Knight, D., & Rizzuto, T. (1993). Relations for children in grades 2, 3, and 4 between balance skills and academic achievement. *Perceptual and motor skills, 76*(3 Pt 2), 1296-1298.

- Koechlin, E., & Summerfield, C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(6), 229-235.
- Konczak, J., & Timmann, D. (2007). The effect of damage to the cerebellum on sensorimotor and cognitive function in children and adolescents. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2-13.
- Lacourse, M. G., Orr, E. L. R., Cramer, S. C., & Cohen, M. J. (2005). Brain activation during execution and motor imagery of novel and skilled sequential hand movements. *NeuroImage*, 27(3), 505-519.
- 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.
- Leggio, M. G., Mandolesi, L., Federico, F., Spirito, F., Ricci, B., Gelfo, F., et al. (2005). Environmental enrichment promotes improved spatial abilities and enhanced dendritic growth in the rat. *Behavioural Brain Research*, 163(1), 78-90.
- Levine, A. J., Miller, E. N., Becker, J. T., Selnes, O. A., & Cohen, B. A. (2004). Normative data for determining significance of test-retest differences on eight common neuropsychological instruments. *The clinical neuropsychologist*, 18(3), 373-384.
- Livesey, D., Keen, J., Rouse, J., & White, F. (2006). The relationship between measures of executive function, motor performance and externalising behaviour in 5- and 6-year-old children. *Human Movement Science*, 25, 50-64.
- Manjunath, N. K., & Telles, S. (2001). Improved performance in the Tower of London test following yoga. *Indian journal of physiology and pharmacology*, 45(3), 351-354.
- Marstzloff, R. (2009). Le cervelet: Encyclopédie médicale Vulgaris.
- Martin, T., Houck, J. M., Bish, J. P., Kicic, D., Woddruff, C. C., Moses, S. N., et al. (2006). MEG Reveals Different Contributions of Somatomotor Cortex and Cerebellum to Simple Reaction Time After Temporally Structured Cues. *Human Brain Mapping*, 27, 552-561.
- Masley, S., Roetzheim, R., & Gualtieri, T. (2009). Aerobic exercise enhances cognitive flexibility. *Journal of clinical psychology in medical settings*, 16(2), 186-193.
- Matsumura, M., Sadato, N., Kochiyama, T., Nakamura, S., Naito, E., Matsunami, K.-I., et al. (2004). Role of the cerebellum in implicit motor skill learning: a PET study. *Brain Research Bulletin*, 63(6), 471-483.

- McCormick, C. C., & Schnobrich, J. N. (1971). Perceptual-motor training and improvement in concentration in a Montessori preschool. *Perceptual and motor skills*, 32(1), 71-77.
- Miall, R. C., Reckness, G. Z., & Imamizu, H. (2001). The cerebellum coordinates eye and hand tracking movements. *Nature Neuroscience*, 4(6), 638-644.
- Middleton, F. A., & Strick, P. L. (2001). Cerebellar projections to the prefrontal cortex of the primate. *The journal of neuroscience*, 21(2), 700-712.
- Milner, T. E., Franklin, D. W., Imamizu, H., & Kawato, M. (2007). Central control of grasp: Manipulation of objects with complex and simple dynamics. *NeuroImage*, 36, 388-395.
- Miura, H., Nagata, K., Hirata, Y., Satoh, Y., Watahiki, Y., & Hatazawa, J. (1994). Evolution of crossed cerebellar diaschisis in middle cerebral artery infarction. *Journal of neuroimaging*, 4(2), 91-96.
- Monyeki, M. A., Koppes, L. L. J., Kemper, H. C. G., Monyeki, K. D., Toriola, A. L., Pienaar, A. E., et al. (2005). Body composition and physical fitness of undernourished South African rural primary school children. *European journal of clinical nutrition*, 59(7), 877-883.
- Morton, S. M., & Bastian, A. J. (2006). Cerebellar contributions to locomotor adaptations during splitbelt treadmill walking. *The Journal of Neuroscience*, 26(36), 9107-9116.
- Naglieri, J. A., & Ronning, M. E. (2000). Comparison of white, African American, Hispanic, and Asian children on the Naglieri Nonverbal Ability Test. *Psychological assessment*, 12(3), 328-334.
- Netter, F. (2002). Le cervelet et ses connections avec les régions du cortex: Atlas of neuroanatomy and neurophysiology.
- O'Connor, C. (1969). Effects of selected physical activities upon motor performance, perceptual performance and academic achievement of first graders. *Perceptual and motor skills*, 29(3), 703-709.
- O'Hare, E. D., Lu, L. H., Houston, S. M., Bookheimer, S. Y., & Sowell, E. R. (2008). Neurodevelopmental changes in verbal working memory load-dependency: an fMRI investigation. *NeuroImage*, 42(4), 1678-1685.
- Olds, T., Tomkinson, G., Léger, L., & Cazorla, G. (2006). Worldwide variation in the performance of children and adolescents: an analysis of 109 studies of the 20-m shuttle run test in 37 countries. *Journal of sports sciences*, 24(10), 1025-1038.

- Parfenova, H., & Leffler, C. (2008). Cerebroprotective functions of HO-2. *Current Pharmaceutical Design, 14*(5), 443-453.
- Pereira, A. C., Huddleston, D. E., Brickman, A. M., Sosunov, A. A., Hen, R., McKhann, G. M., et al. (2007). An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104*(13), 5638-5643.
- Pierce, T. W., Madden, D. J., Siegel, W. C., & Blumenthal, J. A. (1993). Effects of aerobic exercise on cognitive and psychosocial functioning in patients with mild hypertension. *Health psychology, 12*(4), 286-291.
- Raichle, M. E., Fiez, J. A., Videen, T. O., MacLeod, A. M., Pardo, J. V., Fox, P. T., et al. (1994). Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cerebral Cortex, 4*(1), 8-26.
- Reynolds, D., Nicolson, R. I., & Hambly, H. (2003). Evaluation of an exercise-based treatment for children with reading difficulties. *Dyslexia, 9*(1), 48-71; discussion 46.
- Richter, S., Kaiser, O., Hein-Kropp, C., Dimitrova, A., Gizewski, E., Beck, A., et al. (2004). Preserved verb generation in patients with cerebellar atrophy. *Neuropsychologia, 42*(9), 1235-1246.
- Ridderinkhof, K. R., van den Wildenberg, W. P. M., Segalowitz, S. J., & Carter, C. S. (2004). Neurocognitive mechanisms of cognitive control: The role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward-based learning. *Brain and Cognition, 56*, 129-140.
- Robertson, R. J., Goss, F. L., Andreacci, J. L., Dubé, J. J., Rutkowski, J. J., Snee, B. M., et al. (2005). Validation of the children's OMNI RPE scale for stepping exercise. *Medicine and science in sports and exercise, 37*(2), 290-298.
- Rose, F. D., Love, S., & Dell, P. A. (1986). Differential reinforcement effects in rats reared in enriched and impoverished environments. *Physiology & behavior, 36*(6), 1139-1145.
- Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., & Taylor, E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *Neuroimage, 20*, 351-358.
- Sadato, N., Campbell, G., Ibáñez, V., Deiber, M. P., & Hallett, M. (1996). Complexity affects regional cerebral blood flow change during sequential finger movements. *The Journal of Neuroscience, 16*(8), 2693-2700.

- Sakai, K., Ramnani, N., & Passingham, R. (2002). Learning of sequences of finger movements and timing: Frontal lobe and action-oriented representation. *Journal of Neurophysiology*, *88*, 2035-2046.
- 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.
- Saykin, A. J., Johnson, S. C., Flashman, L. A., McAllister, T. W., Sparling, M., Darcey, T. M., et al. (1999). Functional differentiation of medial temporal and frontal regions involved in processing novel and familiar words: an fMRI study. *Brain*, *122* (Pt 10), 1963-1971.
- Schlösser, R., Hutchinson, M., Joseffer, S., Rusinek, H., Saarimaki, A., Stevenson, J., et al. (1998). Functional magnetic resonance imaging of human brain activity in a verbal fluency task. *Journal of neurology, neurosurgery and psychiatry*, *64*(4), 492-498.
- Schmahmann, J. D. (2001). The cerebrocerebellar system: anatomic substrates of the cerebellar contribution to cognition and emotion. *International Review of Psychiatry*, *13*, 247-260.
- Schneider, M., Retz, W., Coogan, A., Thome, J., & Rösler, M. (2006). Anatomical and functional brain imaging in adult attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD)--a neurological view. *European archives of psychiatry and clinical neuroscience*, *256 Suppl 1*, i32-41.
- Seger, C. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (2000). Functional magnetic resonance imaging evidence for right-hemisphere involvement in processing unusual semantic relationships. *Neuropsychology*, *14*(3), 361-369.
- Seidman, L. J., Biederman, J., Monuteaux, M. C., Valera, E., Doyle, A. E., & Faraone, S. V. (2005). Impact of gender and age on executive functioning: do girls and boys with and without attention deficit hyperactivity disorder differ neuropsychologically in preteen and teenage years? *Developmental neuropsychology*, *27*(1), 79-105.
- Shephard, R. J. (1996). Habitual Physical Activity and Academic Performance. *Nutrition Reviews*, *54*(4), 32-36.
- Smiley-Oyen, A. L., Lowry, K. A., Francois, S. J., Kohut, M. L., & Ekkekakis, P. (2008). Exercise, fitness, and neurocognitive function in older adults: the "selective improvement" and "cardiovascular fitness" hypotheses. *Annals of behavioral medicine*, *36*(3), 280-291.

- Steinlin, M. (2007). The cerebellum in cognitive processes: supporting studies in children. *The cerebellum*, 6(3), 237-241.
- Stoodley, C. J., & Schmahmann, J. D. (2009). Functional topography in the human cerebellum: a meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage*, 44(2), 489-501.
- Stroth, S., Hille, K., Spitzer, M., & Reinhardt, R. (2009). Aerobic endurance exercise benefits memory and affect in young adults. *Neuropsychological Rehabilitation*, 19(2), 223-243.
- Tamminga, C. A. (2000). Executive function. *American Journal of Psychiatry*, 157(1), 3.
- Taras, H. (2005). Physical activity and student performance at school. *The Journal of school health*, 75(6), 214-218.
- Thach, W. T. (2007). On the mechanism of cerebellar contributions to cognition. *The cerebellum*, 6(3), 163-167.
- 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.
- Van de Weerd, H., Aarsen, E., Mulder, A., Kruitwagen, C. L. J. J., Hendriksen, C. F. M., & Baumans, V. (2002). Effects of environmental enrichment for mice: variation in experimental results. *Journal of applied animal welfare science*, 5(2), 87-109.
- Van de Weerd, H. A., Van Loo, P. L., Van Zutphen, L. F., Koolhaas, J. M., & Baumans, V. (1997). Nesting material as environmental enrichment has no adverse effects on behavior and physiology of laboratory mice. *Physiology & behavior*, 62(5), 1019-1028.
- van Praag, H. (2009). Exercise and the brain: something to chew on. *Trends in Neurosciences*, 32(5), 283-290.
- van Praag, H., Kempermann, G., & Gage, F. H. (1999). Running increases cell proliferation and neurogenesis in the adult mouse dentate gyrus. *Nature neuroscience*, 2(3), 266-270.
- van Praag, H., Shubert, T., Zhao, C., & Gage, F. H. (2005). Exercise enhances learning and hippocampal neurogenesis in aged mice. *The journal of neuroscience*, 25(38), 8680-8685.

- Viru, A., Loko, J., Volver, A., Laaneots, L., Karelson, K., & Viru, M. (1998). Age periods of accelerated improvement of muscle strength, power, speed and endurance in the age interval 6-18 years. *Biology of Sport*, *15*(4), 211-227.
- Weineck, J. (1997). Manuel d'entraînement. In Vigot (Ed.), *Collection sport + enseignement* (4^e édition ed., pp. 412). Paris.
- Whitney, C., Weis, S., Krings, T., Huber, W., Grossman, M., & Kircher, T. (2009). Task-dependent modulations of prefrontal and hippocampal activity during intrinsic word production. *Journal of cognitive neuroscience*, *21*(4), 697-712.
- Yano, H., Yano, L., Kinoshita, S., & Tsuji, E. (1997). Effect of voluntary exercise on maximal oxygen uptake in young female Fischer 344 rats. *The Japanese journal of physiology*, *47*(1), 139-141.

ANNEXE 1 – QUESTIONNAIRE DE DÉVELOPPEMENT

Numéro participant : _____

HISTOIRE DE LA GROSSESSE ET DE LA NAISSANCE

1 – Avez-vous noté des problèmes lors : (expliquez)
 de la grossesse? Non Oui : _____
 du travail? Non Oui : _____
 de l'accouchement? Non Oui : _____

2 – Durant la grossesse, avez vous pris des médicaments ?
 Non Oui : _____

3 – L'enfant est-il né à terme? Oui Non : il est né à _____ semaines.

4 – L'accouchement a-t-il eu lieu par césarienne? Non Oui
 sous anesthésie générale? Non Oui
 avec l'utilisation de forceps? Non Oui

5 – À la naissance, le bébé avait comme :
 Poids : _____ Taille : _____ APGAR* : _____

***L'APGAR permet d'évaluer l'état d'un nouveau-né et consiste en un score de 0 à 10. Il est mesuré trois fois à quelques minutes d'intervalle. Les résultats de l'APGAR sont indiqués sur le carnet de santé de chaque nouveau-né.**

6 – Le bébé est-il né le cordon ombilical autour du cou? Non Oui

7 – Le bébé a-t-il présenté des problèmes de :
 Jaunisse Difficultés respiratoires Anémie Cyanose Convulsions

HISTOIRE MÉDICALE

1 – L'enfant a-t-il déjà eu des convulsions ou des crises d'épilepsie :
 Non Oui : quel âge avait-il? _____

2 – L'enfant a-t-il des problèmes de vision?
 Ne sais pas Non Oui : lesquels? _____

- 3 – L'enfant a-t-il des problèmes auditifs?
Ne sais pas Non Oui : lesquels? _____
- 4 – L'enfant a-t-il déjà perdu connaissance?
Non Oui : à quelle(s) occasion(s)? _____

- 5 – L'enfant a-t-il déjà eu un accident impliquant la tête?
Non Oui : qu'est-il arrivé? _____

- 6 – L'enfant a-t-il subi des opérations?
Non Oui : laquelle/lesquelles et quand? _____

- 7 – L'enfant a-t-il eu des maladies graves?
Non Oui : laquelle/lesquelles et quand? _____

- 8 – L'enfant a-t-il manqué l'école à cause d'une hospitalisation ou maladie grave ou accident ? Non Oui : quand? _____
Nombre de jours d'absence : _____
- 9 – L'enfant a-t-il déjà consulté en neurologie?
Non Oui : pour quelle(s) raison(s)? _____

- 10 – L'enfant a-t-il eu des infections aux oreilles (otites)?
Non Oui : fréquence? _____
Quand? _____
A-t-il eu des tubes? _____ A-t-il pris des antibiotiques de façon répétée? _____
- 11 – Votre enfant est-il sous médication pour un déficit d'attention (par. ex., Ritalin, Concerta, Dexédrine, Stratera)? Non Oui
- 12 – Votre enfant a-t-il déjà souffert d'asthme, de souffles au cœur, ou de tout autre problème pour lequel il doit limiter sa pratique d'activité physique?
Non Oui : précisez _____

HISTOIRE DU DÉVELOPPEMENT

- 1 – Les premiers mois suivant la naissance ont-ils été difficiles?
Non Oui : pourquoi? _____
- 2 – A-t-il présenté des retards de langage :
Expression : Non Oui Compréhension : Non Oui
- 3 – A-t-il présenté des difficultés dans les :
habiletés motrices globales (marcher, sauter, faire de la bicyclette...)? Non Oui
habiletés motrices fines (boutonner, lacer, dessiner...)? Non Oui
- 4 – Votre enfant est : droitier gaucher ambidextre
- 5 – Votre enfant a-t-il été ou est-il en contact avec les services suivants? (Cochez)
- | | | | |
|--------------|--------------------------|-------------|-----------------|
| Orthophonie | <input type="checkbox"/> | Quand _____ | Fréquence _____ |
| Audiologie | <input type="checkbox"/> | Quand _____ | Fréquence _____ |
| Ergothérapie | <input type="checkbox"/> | Quand _____ | Fréquence _____ |
| Psychologie | <input type="checkbox"/> | Quand _____ | Fréquence _____ |
| Psychiatrie | <input type="checkbox"/> | Quand _____ | Fréquence _____ |

HISTOIRE SCOLAIRE

- 1 – Votre enfant a-t-il déjà doublé une ou plusieurs années scolaires?
Non Oui : laquelle/lesquelles? _____
Pourquoi? _____
- 2 – Votre enfant a-t-il des problèmes de nature académique ou autre à l'école?
Non Oui : précisez _____
En quelle année ces difficultés ont-elles commencées? _____
- 3 – Votre enfant reçoit-il des services de rééducation ou de rattrapage, fait-il partie d'une classe spécialisée?
Non Oui : précisez _____

**ANNEXE 2 – FORMULAIRE D’INFORMATION ET DE
CONSENTEMENT POUR LES PARTICIPANTS ENFANTS ET
LEURS PARENTS**

TITRE DE L’ÉTUDE : Effet d’un entraînement des qualités motrices et d’un entraînement de la capacité aérobie sur les fonctions exécutives chez l’enfant

Chercheur principal et directeur de recherche

Dave Ellemberg Ph.D., Professeur adjoint
Département de kinésiologie, Université de Montréal
2100, Boul. Édouard Montpetit
Montréal, Qc, H3T 1J4
Téléphone : 514-343-7830

Étudiante-chercheure

Marie-Claude Ménard, étudiante à la maîtrise

Téléphone : 514-343-7830

INTRODUCTION

Il est bien connu que l’activité physique est associée à de nombreux bénéfices pour la santé : elle constitue un déterminant important de la croissance osseuse, elle contrôle la masse corporelle et développe un système cardio-pulmonaire en santé. Il a aussi été démontré, chez les adultes et les personnes âgées, que l’activité physique prévenait le déclin des fonctions intellectuelles. Par contre, nous ne savons pas encore si l’activité

physique pourrait également avoir un impact bénéfique sur le fonctionnement du cerveau de l'enfant. Il a été découvert dernièrement qu'un circuit entre deux structures du cerveau est impliqué dans le mouvement et dans les fonctions intellectuelles complexes. Nous croyons donc qu'en entraînant une partie de ce circuit par l'activité physique, nous observerons des améliorations dans le fonctionnement du cerveau de l'enfant. C'est pourquoi nous demandons que votre enfant puisse participer à cette étude.

BUT ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le but de cette étude est d'évaluer l'effet d'un programme d'activité physique sur le cerveau de l'enfant. Pour ce faire, nous allons évaluer certaines fonctions intellectuelles de l'enfant comme la mémoire de travail, l'attention, la catégorisation et le raisonnement.

DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

Cette étude implique la participation d'environ 90 enfants de 6^e année (3 classes). Une fois que vous aurez rempli le formulaire de consentement, nous vous demanderons de remplir un court questionnaire concernant le développement de votre enfant. Le temps de complétion du questionnaire est d'environ 3 minutes. Tous les documents qui vous seront amenés par votre enfant, seront remis à l'enseignant(e) qui les regroupera dans une enveloppe scellée pour la remettre en main propre à l'étudiante-chercheuse.

Deux classes de 6^e année participeront à un programme d'entraînement de 10 semaines. Il s'agira d'un entraînement quotidien de 30 minutes, animé par l'enseignant(e) de la classe. La première classe expérimentale suivra un programme d'entraînement des qualités motrices que sont la coordination, l'équilibre, l'agilité, le rythme et le contrôle du mouvement. La deuxième classe expérimentale suivra un programme d'entraînement de la capacité aérobie (endurance cardiovasculaire). Avant et après les 10 semaines d'entraînement, les deux classes participeront à une séance de tests collectifs et individuels, décrits ci-après. La troisième classe de 6^e année sera le groupe contrôle et n'effectuera pas d'entraînement outre le programme scolaire normal, seulement les tests en septembre et en décembre seront faits. La répartition des classes entre le groupe contrôle et les groupes

entraînés est faite avec la disponibilité des enseignants. Pour ce qui est de la répartition entre les deux types d'entraînement, un tirage au sort a été fait.

En décembre et en mars, deux séances de tests seront faites. Une partie de ces séances sera faite collectivement, où des tests de la capacité aérobie (endurance cardio-vasculaire) et du quotient intellectuel seront faits. Le test de quotient intellectuel sera administré pour s'assurer que les enfants des différents groupes de l'étude sont égaux sur cet aspect. La deuxième partie sera individuelle, et des tests d'évaluation des fonctions intellectuelles seront faits. Les tests faits sont tous de nature orale ou papier-crayon, des questions sont posées à l'enfant qui doit répondre du mieux qu'il peut. Nous évaluerons la capacité de catégorisation, de fluence verbale, de mémoire à long terme, d'attention, et nous évaluerons la coordination motrice. Ces séances seront de deux heures chacune. Voir la section CARACTÈRE CONFIDENTIEL DES INFORMATIONS pour des précisions sur l'utilisation des résultats aux tests.

CONDITIONS DE PARTICIPATION

Tous les élèves des groupes entraînés participeront aux activités. Par contre, pour que les résultats soient inclus dans l'étude, les enfants ne doivent présenter aucuns troubles d'apprentissage, troubles neurologiques ou problèmes de santé physique connus. Les enfants ne devront jamais avoir subi de commotion cérébrale ou de coups répétitifs à la tête (par exemple : coups de tête au soccer). Ils devront tous avoir une vision normale ou normale après correction. Tout ceci sera vérifié à l'aide du questionnaire sur le développement qui vous sera remis une fois le formulaire de consentement signé.

AVANTAGES À PARTICIPER

Vous aurez la satisfaction d'avoir contribué à l'avancement des connaissances quant aux effets de l'activité physique sur le fonctionnement cognitif de l'enfant. Les résultats de la présente étude et de d'autres études à venir permettront d'identifier certaines des fonctions du cerveau pouvant être améliorées par l'activité physique. À la fin de l'étude, les résultats seront divulgués aux participants qui le désirent.

RISQUES ET INCONFORTS

Il y a risque de déshydratation lors du test Navette et lors des entraînements. C'est pourquoi des pauses pour s'hydrater seront intégrées aux activités. De plus, l'apparition de tout symptôme inhabituel (symptômes physiques comme essoufflement exagéré, douleur, étourdissements, etc.) ou le désir de l'enfant d'interrompre l'activité entraînera l'arrêt immédiat de sa participation. Lors des tests physiques, les risques d'étourdissement et cardio-vasculaire demeurent présents, c'est pourquoi des professionnels de l'activité physique seront présents, tous possédant des qualifications de premiers soins, pour s'assurer d'une intervention adéquate dans le cas d'un incident. Dans le cadre des entraînements quotidiens, l'infirmière de l'école demeure disponible. Un dernier inconfort pourrait être l'ennui causé par les tests neuropsychologiques.

PARTICIPATION VOLONTAIRE ET RETRAIT OU EXCLUSION DE L'ÉTUDE

La participation de votre enfant à l'étude est libre et volontaire. Vous pouvez retirer votre enfant de l'étude en tout temps sans avoir à justifier votre décision. Peu importe la décision prise, cela n'affectera pas la qualité des services qui sont offerts à votre enfant, ni sa relation avec le personnel enseignant. De plus, votre enfant pourra à tout moment mettre fin à sa participation à l'étude, il n'aura qu'à avertir la personne responsable. Dans le cas où votre enfant se retire au point de ne plus participer aux entraînements, des activités de remplacement seront planifiées pour occuper son temps de manière constructive pendant les entraînements.

CARACTÈRE CONFIDENTIEL DES INFORMATIONS

Toutes les informations provenant de l'évaluation seront utilisées pour des fins de recherche. Le nom de votre enfant sera changé par un code afin de rendre anonymes les informations. Les données seront codées et protégées par un mot de passe dans un fichier informatique et une copie de ces données sera gardée sur disque compact et entreposée sous clef dans un classeur avec les protocoles. Seuls l'étudiante-chercheure et son directeur de recherche auront accès à la clef du classeur de même qu'au mot de passe du fichier informatique contenant les données. Toutes les analyses se feront au sein du laboratoire par

l'étudiante-chercheuse du projet sous la supervision de son directeur de recherche. Les données seront conservées en lieu sûr pour une durée de 7 ans, et seront par la suite détruites. Les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un congrès scientifique, mais aucune information pouvant identifier votre enfant ne sera alors dévoilée. À des fins de contrôle et de surveillance de la qualité de la recherche, certains membres de comités d'éthique de la recherche ou organisme pourront également avoir accès aux données de recherche.

Il est à noter que les résultats individuels ne seront pas transmis aux parents, à moins qu'ils en fassent la demande expresse. Les parents ont en tout temps accès au dossier de recherche de leur enfant. Dans le cas où un enfant se retire de l'étude, soyez certains que toutes les données le concernant seront détruites.

COMMUNICATION DES RÉSULTATS GÉNÉRAUX

Les résultats de ce projet seront présentés et publiés. Ceci se fait par le biais d'un article publié dans une revue scientifique et lors de présentations orales avec figures comme support visuel. Les données seront aussi décrites dans le mémoire de l'étudiante-chercheuse. Le tout sera présenté sous forme de tableau et de graphiques, et l'emphase sera mise sur les changements observés conséquemment à l'entraînement, non sur les résultats directs de votre enfant.

QUESTIONS SUR L'ÉTUDE

Pour plus d'informations concernant cette recherche, contactez (avant, pendant et après l'expérimentation) Marie-Claude Ménard, étudiante à la maîtrise, au 514-343-7830 ou par courriel à marie-claude.menard@umontreal.ca. Vous pouvez également joindre le chercheur principal de cette étude, Dave Ellemberg, Ph.D. au 514-343-7830 ou par courriel à dave.ellemberg@umontreal.ca.

EN CAS DE PROBLÈME ÉTHIQUE

Pour tous problèmes éthiques concernant les conditions dans lesquelles se déroule votre participation à ce projet, vous pouvez, après en avoir discuté avec le responsable du projet,

expliquer vos préoccupations à la présidente du Comité d'éthique de la recherche des Sciences de la santé, Madame Marie-France Daniel (Téléphone 514-343-5624). Suite à cet entretien, si vous avez des raisons sérieuses de croire que la réponse apportée est insuffisante, vous pourrez entrer en communication avec l'ombudsman de l'Université, Madame Marie-José Rivest (Téléphone 514-343-2100).

CONSENTEMENT ET ASSENTIMENT

TITRE DE L'ÉTUDE : Effet d'un entraînement des qualités motrices et d'un entraînement de la capacité aérobie sur les fonctions exécutives chez l'enfant

Je, (nom du parent en lettres moulées)..... déclare avoir pris connaissance des documents ci-joints dont je recevrais une copie signée et datée de (nom du chercheur responsable en lettres moulées)..... et comprendre le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de l'étude en question.

Après réflexion et un délai raisonnable, je consens librement à ce que (nom de l'enfant en lettres moulées)..... prenne part à cette étude. Je sais que je peux le retirer de l'étude en tout temps sans conséquence négative d'aucune sorte.

Signature du parent Date

Signature de l'enfant (assentiment) Date

Signature de l'étudiante-chercheure Date

CHERCHEUR RESPONSABLE DE L'ÉTUDE :

Je, (nom en lettres moulées du chercheur responsable).....

déclare que nous avons expliqué le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de l'étude à (nom en lettres moulées du parent et de l'enfant)

..... et

Signature de l'investigateurDate

ANNEXE 3 – DESCRIPTION VULGARISÉE DU PROJET

La kinésiologie



La kinésiologie est une jeune discipline universitaire qui étudie le mouvement humain dans la pratique de l'activité physique. On l'étudie dans quatre contextes différents : pour les loisirs, pour la prévention, pour la recherche de performance et pour l'amélioration de la santé. La kinésiologie fait appel à plusieurs domaines reliés à l'activité physique et au sport tels que l'anatomie, l'apprentissage moteur, la biomécanique, mais aussi à d'autres disciplines comme la physiologie, la psychologie et la sociologie.¹

Le projet auquel votre enfant est invité à participer mixe les domaines de la kinésiologie et de la psychologie. L'étude des effets de l'activité physique sur les fonctions intellectuelles a déjà été faite auprès d'adultes et d'ânés. Nous savons que les effets de l'activité physique préviennent la perte de capacités intellectuelles avec le vieillissement. Chez les enfants, très peu d'études ont examiné cet effet de l'activité physique. C'est donc ce que nous étudieront : les effets qu'un programme d'entraînement aura sur le fonctionnement du cerveau de l'enfant.



Les observations faites dans ce domaine permettront de créer des programmes spécifiques qui, par l'activité physique, amélioreront les habiletés intellectuelles des enfants en plus des aspects physiques. Ceci pourrait aussi être utilisé avec des enfants ayant des troubles d'apprentissage dans différents domaines ou des enfants atteints d'hyperactivité ou d'autisme.



¹ Source : Département de kinésiologie, Université de Montréal, <http://www.kinesio.umontreal.ca/>

ANNEXE 4 – AVIS FAVORABLE DU COMITÉ SCIENTIFIQUE DU DÉPARTEMENT DE KINÉSIOLOGIE



Département de kinésiologie

Montréal, le 17 septembre 2007

Dossier CS 37

Laurent Bosquet
Président du Comité Scientifique

à

Dave Ellemborg
Marie-Claude Ménard (étudiante)

Objet : Avis du Comité Scientifique du Département de Kinésiologie

Cher collègue,

Vous avez soumis le projet intitulé «Effet d'un entraînement des qualités motrices et d'un entraînement de la capacité aérobie sur les fonctions exécutives chez l'enfant» pour avis du Comité Scientifique du Département de Kinésiologie.

Après examen du document soumis, les membres du Comité ont émis un avis favorable au projet.

Je vous prie de recevoir l'expression de mes salutations distinguées,

Laurent Bosquet

ANNEXE 5 – CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DU COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE DES SCIENCES DE LA SANTÉ

Université 
de Montréal

Dossier No. 822

Département de kinésiologie

Montréal, le 14 novembre 2007

Monsieur Dave Ellemberg
Professeur adjoint
Département de kinésiologie
CEPSUM, 2100 boul. Édouard-Montpetit
Bureau 8221

OBJET : Certificat d'éthique

Monsieur Ellemberg,

Vous avez soumis le projet intitulé « Effet d'un entraînement des qualités motrices et d'un entraînement de la capacité aérobie sur les fonctions exécutives chez l'enfant » pour évaluation éthique. Ce projet a fait l'objet d'un examen préliminaire et, par la suite, a été évalué en séance plénière par le Comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé (CÉRSS).

Je suis heureuse de vous informer que le Comité a jugé le projet conforme aux normes déontologiques. Un certificat d'éthique a donc été émis et vous est envoyé.

Le certificat d'éthique est émis pour une durée d'un an. À l'échéance, un suivi déontologique sera effectué, conformément aux normes de fonctionnement du Plan d'action ministériel en éthique de la recherche et en intégrité scientifique.

Il est aussi à souligner que vous devrez faire part au CÉRSS de toute nouvelle information (changement dans les connaissances scientifiques...) ou observation (événement négatif...) ou de tout changement au protocole expérimental, qui pourrait modifier le fondement éthique sur lequel repose votre projet de recherche.

Je vous prie de recevoir, Monsieur, l'expression de mes salutations distinguées.

Marie-France Daniel
Présidente
Comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé
CEPSUM, 2100 Edouard-Montpetit, bureau 7211
Téléphone : (514) 343-5624
Télécopieur : (514) 343-2181
Courriel :

p.j.

**COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE DES SCIENCES DE LA SANTÉ
(CÉRSS)**

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE

Titre du projet : Effet d'un entraînement des qualités motrices et d'un entraînement de la capacité aérobie sur les fonctions exécutives chez l'enfant.

Sous la direction de : Monsieur Dave Ellemberg

Nom de l'étudiante : Madame Marie-Claude Ménard

À la réunion du 5 novembre 2007, 7 membres du CÉRSS étaient présents : la présidente, l'experte en éthique, l'experte en droit, la représentante de la Faculté des sciences infirmières, le représentant du Département de kinésiologie, la représentante de la Faculté de médecine dentaire et le représentant du public.

Le Comité a jugé le projet mentionné ci-haut conforme aux règles d'éthique de la recherche sur les êtres humains.

Le certificat est émis pour la période du 14 novembre 2007 au 13 novembre 2008.

Le 14 novembre 2007.

Marie-France Daniel
Présidente
Comité d'éthique de la recherche des sciences de la santé
CEPSUM, 2100, Édouard-Montpetit, bureau 7211
Téléphone : (514) 343-5624
Télécopieur : (514) 343-2181
Courriel :

ANNEXE 6 – ÉCHELLE DE PERCEPTION DE L'EFFORT POUR LES ENFANTS



Échelle de perception de l'effort de Borg
Modifiée par Marie-Claude Ménard
Janvier 2008

ANNEXE 7 – AUTORISATION DES COAUTEURS DE L'ARTICLE

1. Identification de l'étudiante et du programme

Marie-Claude Ménard

M.Sc. Sciences de l'activité physique (2-350-1-0)

2. Description de l'article:

Comparison of neuromotor and aerobic training on cognitive functions in children

Marie-Claude Ménard et Dave Elleberg

Article soumis le 11 août 2009 à la revue *Human Movement Science*

3. Déclaration de tous les coauteurs autres que l'étudiant

À titre de coauteur de l'article identifié ci-dessus, je suis d'accord pour que Marie-Claude Ménard inclue l'article identifié ci-dessus dans le mémoire de maîtrise qui a pour titre **Effets d'un entraînement neuromoteur et d'un entraînement aérobie sur les fonctions exécutives chez l'enfant.**

Coauteur

Signature

Date

12/08/09