

Table des matières

Sommaire	iv
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Remerciements.....	x
Introduction	1
Les fonctions exécutives	5
Développement des fonctions exécutives	10
2 à 6 ans	10
8 à 13 ans	11
L'inhibition	12
Classifications de l'inhibition	14
Fonctions liées à l'inhibition.....	15
L'inhibition des mouvements volontaires et l'inhibition oculomotrice.....	16
Les mesures et le développement de l'inhibition.....	18
L'électrophysiologie	19
La neuropsychologie clinique	233
Évaluation de l'inhibition en neuropsychologie clinique	25
Épreuves simples et épreuves complexes	266
Inhibition chaude et inhibition froide	277
Développement de l'inhibition selon la neuropsychologie clinique..	288
0 à 3 ans	299

4 à 5 ans	377
6 à 12 ans	4141
Résumé global du développement de l'inhibition selon la neuropsychologie clinique	444
Oculométrie	455
Saccades.....	465
Variables mesurées	477
Antisaccades	477
Fixation	488
Développement des saccades et antisaccades.....	499
Études chez les bébés.....	50
Vitesse.....	53
Latence.....	544
Précision	554
Corrélations entre psychométrie et traquage oculaire.....	576
Objectifs	59
Chapitre I. Inhibition Development: Comparison of Neuropsychological and Eye Tracking Measures	61
Abstract	63
Resumen.....	64
1. Introduction	65
2. Method	67
2.1. Participants.....	67

2.2. Procedure and instruments	68
2.2.1. Neuropsychological testing	69
2.2.2. Eye Tracking Test Procedures	70
2.2.3. Eye Movement Analysis	71
3. Results	72
3.1. Preliminary analyses	72
3.2. Correlation of inhibition measures and age	73
3.2.1. Neuropsychological tests	73
3.2.2. Eye tracking tasks	73
3.3. Convergence between neuropsychological and ET tests	74
3.4. Eye tracking tasks difference	75
4. Discussion	75
Author notes	78
References	79
Discussion générale	83
Conclusion générale	899
Références	922
Appendice A. Tableau 1	102
Appendice B. Normes de présentation de la revue Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento	112

Liste des tableaux

Tableau

1	Age and gender distribution of participants completing tasks	68
2	Mean and standard deviation of neuropsychological and eye tracking variables	72
3	Neuropsychological tests variable correlations with age	73
4	Saccade variable correlations with age and WDW score	74

Liste des figures

Liste des figures dans l'essai

Figure

- 1 Tâche de la porte (The Door Task). L'enfant voit une balle descendre une rampe qui passe derrière 4 portes opaques. Le lieu d'arrivée de la balle est donc dissimulé, mais l'enfant voit le haut d'une planchette qui arrête la balle, derrière l'une des portes (Berthier et al., 2000).366

Liste des figures dans l'article scientifique

Figure

- 1 A. Fixation task: look maintained towards center of screen. B. Antisaccade task: Saccade towards opposite side of target.....71

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à mes directeurs d'essai madame Annie Stipanivic Ph.D. et monsieur Sylvain Sirois Ph.D., professeurs au département de psychologie de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour leur soutien et leurs conseils. Je tiens également à remercier sincèrement madame Julie Brisson Ph.D. pour son soutien indéfectible et ses encouragements inestimables. Merci aussi à madame Dominique Mailloux, doctorante en psychologie ainsi qu'à monsieur Serge Caparos Ph.D. pour leur aide logistique.

Je suis également fort reconnaissant envers les élèves, leurs parents et les intervenants des écoles qui ont généreusement accepté de participer à la présente recherche.

Finalement, merci à toi Maude pour ta sensibilité, ta grande patience, ton sens de l'humour et ta compréhension.

Rapport-Gratuit.com

Introduction

L'inhibition est une fonction cognitive essentielle. Elle consiste à réagir en faisant fi d'une réponse automatique ou usuelle (Miyake & Friedman, 2012). Elle est essentielle au développement des enfants : elle permet d'éviter les dangers (par ex. : ne pas courir autour d'une piscine), d'agir de manière appropriée dans une situation donnée (ne pas dire des gros mots à l'école) et d'optimiser les apprentissages (ne pas regarder par la fenêtre lorsqu'on complète un examen). L'évaluation clinique de l'inhibition grâce à des épreuves psychométriques éclaire sur le développement de cette fonction chez un enfant en le comparant à la norme. Plus spécifiquement, cette évaluation rend possible l'appréciation de cette capacité chez les enfants qui présentent des difficultés neurodéveloppementales (trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité, trouble d'apprentissage, déficience intellectuelle, etc.). La meilleure connaissance de l'état de cette capacité rend possible la mise en place d'interventions pertinentes à leur problématique spécifique qui permet éventuellement de les aider concrètement. Ces interventions sont susceptibles d'améliorer leurs capacités au quotidien, tant en milieu scolaire qu'en milieu familial.

Par ailleurs, la recherche fondamentale étudie aussi le développement de l'inhibition pour comprendre le développement normal et pour aider les enfants en difficulté. Afin d'optimiser les interventions mises en place auprès des jeunes rencontrés en clinique, le transfert des connaissances entre la recherche et la clinique est primordial.

Dans les écrits scientifiques, une quantité très importante d'informations sur l'inhibition est disponible. Il existe deux types principaux d'inhibition duquel découlent plusieurs modèles: l'inhibition « passive » décrivant les types de personnalité et l'inhibition « active » qui serait une capacité de contrôle attentionnel dirigé, telle que décrite dans les études traitant de psychologie cognitive et de neurosciences cognitives (Harnishfeger, 1995; Kochanska, Murray, Jacques, Koenig, & Vandegeest, 1996; Nigg, 2000). Il manque toutefois d'intégration entre les modèles cognitifs et les modèles de personnalité, ce qui limite la recherche et les conclusions qu'on peut en tirer. En effet, les différentes capacités que les chercheurs appellent « inhibition » peuvent facilement être des processus différents. Pour tenter d'éclairer les connaissances sur le sujet, la présente étude présentera l'inhibition active et son développement chez les enfants. De plus, la compréhension qu'en ont les chercheurs sera abordée, avant d'étudier deux aspects très spécifiques de celle-ci par l'utilisation de deux mesures employées en recherche pour l'appréhender.

Le contenu du présent essai sera donc constitué, dans un premier temps, d'un contexte théorique exhaustif expliquant ce qu'est l'inhibition et comment elle se développe selon les connaissances issues de la neuropsychologie et des recherches oculométriques. La recherche qui est le sujet du présent essai a déjà été publiée sous forme d'article scientifique dans la revue « Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento » (Mainville, Brisson, Nougrou, Stipanovic, & Sirois, 2015) parue en

mars 2015. C'est donc cet article tel qu'il est paru qui sera présenté dans un deuxième temps.

Dans la première portion de cet essai, l'inhibition, son développement et sa mesure seront décrits. Plus spécifiquement, nous ferons l'état des lieux sur les conceptions de l'inhibition et, ce faisant, des fonctions exécutives (FE). Pour ce faire, nous examinerons d'abord les FE selon la compréhension et la conception d'auteurs clés dans le domaine, avant de brièvement discuter de leur développement chez les enfants. L'inhibition et son apport seront ensuite présentés. Les différentes manières de subdiviser l'inhibition et les épreuves qui l'évaluent dans la littérature scientifique seront développées. Quelques connaissances sur l'inhibition tirées d'études électrophysiologiques conduites chez des enfants seront citées pour expliciter certains processus cérébraux sous-jacents à l'inhibition. L'évaluation neuropsychologique sera abordée, avant que le développement de l'inhibition chez l'enfant ne soit décrit par l'intermédiaire des connaissances tirées de recherches en neuropsychologie. Ensuite, l'évaluation oculométrique sera présentée. Les épreuves de saccades, d'antisaccades (AS) et de fixation seront décrites et leur développement chez les enfants sera discuté. Finalement, des études où les mesures neuropsychologiques et oculométriques ont été évaluées en parallèle seront explicitées. Nous présenterons le développement de l'inhibition motrice et oculomotrice chez les enfants.

Les fonctions exécutives

La capacité d'inhiber les comportements est centrale dans la majorité des modèles théoriques des FE. Les FE sont un ensemble de processus mentaux assez généraux qui régulent les pensées et les comportements. Ce sont des habiletés qui permettent la résolution de problèmes complexes et relativement nouveaux auxquels nous faisons face au quotidien (Miyake & Friedman, 2012). Ces processus comprennent en plus de l'inhibition, la mémoire de travail (MdT) et la flexibilité cognitive (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howerter, 2000).

Les FE sont essentielles à la mise en place de comportements efficaces et appropriés au contexte d'une personne (Votruba, & Langenecker, 2013). Un grand nombre d'auteurs ont défini les FE et quelques-uns seront mentionnés dans les prochains paragraphes. Miyake et ses collègues (2000) donnent une définition qui décrit bien l'origine, les moyens et l'objectif des FE. Pour ce groupe d'auteurs ayant mené un grand nombre d'études auprès d'échantillons d'adulte, les FE constituent un ensemble de fonctions neurocognitives volontaires et descendantes (*top down*), impliquées dans les processus de pensées, d'émotions et d'actions dirigées vers un but conscient. Cette définition différencie bien les activités routinières, pour lesquelles des réponses automatiques suffisent (par exemple : prendre sa douche, lacer ses souliers, mettre un habit de ski, etc.), des activités qui sollicitent toute notre attention et nos énergies cognitives (par exemple : répondre à un examen portant sur de la matière nouvellement apprise, réagir à un accident de vélo, comprendre un ami qui parle avec un fort accent).

Ainsi, cette définition situe bien les FE comme étant des processus auxquels on fait appel dans les situations qui nécessitent une réponse modulée en fonction du contexte ou une réponse complètement originale.

L'intérêt pour les FE ne date pas d'hier. Luria (1966) fut l'un des premiers à s'intéresser aux mécanismes cognitifs sous-jacents à la résolution de problèmes. Il tentait de les comprendre en établissant des liens entre ces mécanismes et le fonctionnement du lobe frontal. Pour ce faire, il étudiait des patients qui avaient subi des lésions au niveau du lobe frontal en comparant leurs performances à celles de personnes non lésées. Il en a déduit que la capacité de résoudre des problèmes reposait sur différentes fonctions: l'anticipation (la mise en place d'attentes et la compréhension des conséquences possibles), la planification (l'organisation des étapes), l'exécution (la flexibilité et l'inhibition des stimuli distrayants) et l'autocontrôle (contrôle émotif et reconnaissance des erreurs). Nous constatons donc que, dès ce moment, l'inhibition faisait partie de la conception de l'auteur du modèle, même si elle n'était alors qu'une composante de l'exécution et n'était considérée que dans sa portion de contrôle de l'attention pendant la phase de l'exécution d'une solution à un problème. Aujourd'hui, des auteurs tels que Knight et Stuss (2002) considèrent que la fonction la plus importante du cortex préfrontal est de diriger le comportement par l'activation et l'inhibition des autres aires du cerveau. Ainsi, le cortex préfrontal s'assure que la fonction la plus pertinente est la seule qui soit en action au niveau de la conscience, au moment opportun.

Les différents auteurs ayant mené des recherches sur les FE avancent des définitions, des conceptions et des modèles de FE qui diffèrent (Baddeley, 2002; Stuss & Alexander, 2000). Selon leur expertise et leur centre d'intérêt, les théoriciens ont des conceptions relativement variées dont quelques-unes seront abordées ici.

Tout d'abord, selon des chercheurs-cliniciens qui tirent leur compréhension des FE de leur expérience auprès des patients ayant subi des lésions cérébrales (Lezak, Howieson, Bigler, & Tranel, 2012), les FE sont des processus qui contribuent à la résolution de problèmes. Les chercheurs-cliniciens dégagent différentes étapes à ce processus : la volonté de résoudre le problème, la planification des étapes nécessaires, la mise en place d'actions dirigées vers le but qui soient efficaces et l'évaluation du résultat. Cette conception segmente le déroulement de la résolution de problèmes et suggère ce qui devrait être évalué chez un patient.

D'autres chercheurs se basent sur une perspective de neuropsychologie développementale et conceptualisent aussi les FE comme une série d'étapes nécessaires à la résolution de problèmes nouveaux et complexes (Zelazo, Carter, Reznick, & Frye, 1997). Pour eux, ces étapes de résolution de problème sont : la représentation mentale du problème, la planification, l'exécution et l'évaluation. Ce modèle permet de bien appréhender les FE dès leur apparition et tout au long du développement des enfants.

D'un autre côté, Stuss, Shallice, Alexander et Picton (1995) décrivent les FE selon le modèle de traitement de l'information. Selon eux, les FE sont constituées d'un ensemble de routines et de sous routines qui interagissent sous le contrôle exécutif pour répondre aux problèmes auxquels un individu fait face. Cette compréhension des FE se fonde généralement sur des résultats de recherches fondamentales et permet une bonne compréhension globale des FE.

Enfin, pour Barkley (2012) les FE sont bel et bien des capacités cognitives, mais pour bien les comprendre, il importe de saisir leur mise en place et leur implication dans toutes les sphères de vie d'un client. Selon l'auteur, il est primordial de considérer la manière dont une personne met à profit ses fonctions exécutives pour interagir avec les personnes de son environnement plus ou moins proche. Cette conceptualisation englobe donc tous les aspects de la vie d'un individu et implique qu'une évaluation neuropsychologique seule ne suffit pas pour assurer une compréhension du fonctionnement exécutif. C'est donc une évaluation très exhaustive qu'il faut compléter. Cette approche est donc beaucoup plus globale et complexe que les autres conceptions déjà présentées, toutefois elle est encore relativement nouvelle et demande plus de recherches empiriques pour que sa pertinence soit démontrée.

Il apparaît donc que plusieurs conceptions des FE sont décrites dans la littérature. Toutefois, c'est le modèle théorique de Miyake, Friedman, Rettinger, Shah et Hegarty (2001) qui est privilégié dans la présente recherche. Leur conception des FE a été

validée empiriquement à maintes reprises et a été étudiée avec grands détails auprès d'échantillons d'adultes de plusieurs groupes d'âge. Ceci suggère donc que ce modèle théorique est confirmé par des données solides et nombreuses qui démontrent la pertinence de son application à la pratique clinique. Au fil de leur recherche, cette équipe de chercheurs a employé une méthode d'analyse des résultats d'évaluation psychométriques par analyse factorielle et équations structurelles. Ceci leur a permis d'extraire ce qui est commun aux différentes tâches. Les variables latentes obtenues en fin de compte sont considérées comme étant les FE (Miyake & Friedman, 2012).

Pour ces auteurs, les FE réfèrent à un ensemble de processus mentaux généraux qui régulent les pensées et les comportements. Ce sont des habiletés qui permettent la résolution de problèmes complexes et plus ou moins nouveaux auxquels nous faisons face sur une base quotidienne. Leur modèle a tout d'abord été élaboré auprès de participants adultes. Des recherches subséquentes l'ont employé dans l'étude d'une clientèle d'enfants, avec une méthode similaire. Ainsi, selon le modèle, trois fonctions composent les FE: la flexibilité (la capacité d'alterner entre plusieurs tâches cognitives), la mise à jour (la capacité de retenir et manipuler de l'information en MdT) et l'inhibition (la capacité à ne pas émettre une réponse automatique face à un stimulus). Les FE sont à la fois unitaires et diversifiées: elles corrèlent de façon importante, mais ces corrélations sont loin d'être parfaites: les tests mesurant la flexibilité et la mise à jour comportent des aspects spécifiques tandis que l'inhibition est la composante qui a le plus

d'aspects en commun avec les 2 autres. Ce modèle théorique et sa nomenclature seront ceux auxquels nous ferons référence dans le présent texte.

Développement des fonctions exécutives

En plus des études auprès d'adultes, des chercheurs ont étudié les compétences des enfants dans la passation d'épreuves évaluant différentes FE. La plupart des recherches sondent une des compétences à la fois. Dans leur méta-analyse auprès de sujet de moins de 1 an, Garon, Bryson et Smith (2008) constatent que les capacités de MdT et d'inhibition sont déjà présentes dans cette population. Les études ne constatent des évidences de capacité de flexibilité que chez des sujets de près de 2 ans. Il y a toutefois des chercheurs qui ont adopté des approches similaires à celle de Miyake et ses collègues (2000) auprès d'échantillons d'enfants: ils ont procédé à des études du développement typique (DT) des FE chez les enfants en utilisant l'analyse factorielle. Ils ont ainsi cherché à savoir dans quel ordre et comment les FE apparaissent dans le développement. Deux études sur le développement des FE sont présentées ici pour illustrer la progression des FE chez les enfants en âge préscolaire et primaire (soit de 2 à 13 ans).

2 à 6 ans. Wiebe, Espy et Charak (2008) ont étudié les capacités cognitives de 243 enfants âgés entre 2, 3 et 6 ans. Ces enfants ont répondu à une batterie de tests neuropsychologiques destiné à mesurer deux FE: l'inhibition et la MdT. Les auteurs n'ont pas testé la flexibilité, parce qu'il leur avait été impossible de trouver ou de créer

des tests mesurant cette capacité chez les enfants d'âge préscolaire. Leur analyse fait ressortir un facteur principal comprenant à la fois la MdT et l'inhibition. Les auteurs considèrent que ces résultats suggèrent que, chez les enfants de moins de 6 ans, il n'y aurait pas encore de distinction objectivable quant aux différentes FE. Ce construit ne constitueraient en fait qu'une fonction unitaire qui, contrairement aux adultes, ne serait pas encore diversifiée. Les mêmes résultats ont été reproduits dans une étude similaire menée auprès de 228 enfants âgés en moyenne de 3 ans (Wiebe et al., 2011).

8 à 13 ans. De leur côté, Lehto, Juujärvi, Kooistra et Pulkkinen (2003) ont testé des enfants âgés de 8 à 13 ans avec des tests neuropsychologiques destinés à mesurer l'inhibition, la mise à jour et la flexibilité mentale. Ils identifient, au terme d'analyses factorielles, les mêmes trois facteurs que Miyake et Friedman (2012) ont identifiés chez les adultes: flexibilité, mise à jour et inhibition. Cette recherche suggère que, chez les enfants de 8 à 13 ans, les FE sont distinctes et indépendantes comme chez les adultes.

Le contraste entre les résultats démontre une unité des facteurs chez les enfants âgés entre 2 et 6 ans et une plus grande indépendance des facteurs chez ceux âgés entre 8 et 13 ans. Ceci suggère une progression des FE pour les enfants âgés entre 6 et 8 ans, groupe d'âge sur lequel s'attarde la présente étude.

L'inhibition

Selon Miyake et Friedman (2012), l'inhibition occupe un rôle clé de par sa composante commune et indissociable des deux autres FE, tandis que la mise à jour et la flexibilité mentale sont des fonctions spécifiques et indépendantes. En effet, l'inhibition forme le facteur qui a le plus d'aspects en commun avec la flexibilité et la mise à jour et qui a la corrélation intra-indice la plus faible (Miyake et al., 2001). Même pour les auteurs qui ont étudié les FE et conçu des modèles théoriques différents de celui de Miyake et Friedman, la capacité d'inhibition demeure centrale (Carlson, 2005; Diamond & Lee, 2011; Zelazo et al., 1997). L'inhibition serait donc la fonction qui est la plus utile aux autres FE, mais aussi, pour cette raison, la plus difficile à saisir empiriquement. C'est donc pour son importance, pour sa complexité et parce qu'elle est la fonction qui se développe le plus tôt chez les enfants (Garon et al., 2008) que la présente recherche étudiera spécifiquement l'inhibition.

Dit simplement, l'inhibition est une fonction cognitive qui consiste à réagir en faisant fi d'une réponse automatique ou usuelle (Miyake & Friedman, 2012). Si on la décrit en utilisant les termes propres à la littérature sur les FE, c'est la capacité à maintenir les informations non pertinentes hors de la MdT (Harnishfeger, & Bjorklund, 1993). Cette dernière définition illustre bien comment, malgré les différences entre les FE, celles-ci sont inter-reliées et en interaction simultanément au fil de la résolution d'un problème.

L'inhibition est à la base du développement cognitif. Selon Harnishfeger (1995), l'inhibition permet également aux enfants d'avoir un meilleur contrôle moteur, une meilleure attention et une meilleure mémoire. En libérant la MdT des informations non pertinentes, l'inhibition permet des apprentissages de plus en plus efficaces et de plus en plus complexes.

L'importance de l'inhibition a été maintes fois recensée dans des études longitudinales. Entre autres, Brock, Rimm-Kaufman, Nathanson et Grimm (2009) ont constaté un lien significatif entre les FE évaluées en début d'année de niveau maternelle et la réussite mathématique en fin d'année scolaire. À plus long terme (Zelazo & Carlson, 2012), il apparaît que la capacité d'inhibition est fortement liée à des conséquences développementales importantes. La capacité de différer la gratification (par exemple, résister à manger une friandise quand on sait que si l'on patiente quelques minutes il sera possible d'en obtenir deux) est une mesure d'inhibition reconnue chez les enfants en âge préscolaire. De plus, l'inhibition serait un bon prédicteur du fonctionnement social 20 ans plus tard, lorsque les participants ont atteint l'âge adulte. Également, peu importe le quotient intellectuel ou le statut socioéconomique, la capacité de différer la gratification permet de prédire les scores à un test normalisé (Scholastic Aptitude Test, le test généralement utilisé aux États-Unis pour évaluer la candidature des étudiants qui désirent être admis aux études supérieures) et la non-utilisation de drogues illicites (Ayduk et al., 2000).

De plus, Kochanska, Murray et Coy (1997) ont étudié le développement de l'inhibition dans une étude longitudinale en prenant des mesures chez des enfants à 2 ans et demi, à 4 ans, puis à 5 ans et demi. Selon cette étude, les scores aux temps 1 et 2 prédisaient bien le score au temps 3. Ceci souligne donc la stabilité de l'inhibition dans le temps. Ainsi, l'évaluation précoce de l'inhibition est à privilégier, étant donné qu'elle fournit une occasion d'intervenir le plus tôt possible dans le développement. Les interventions précoces permettent alors d'avoir un impact significatif et durable dans la vie de l'enfant (Diamond & Lee, 2011; Diamond & Ling, 2016; Kochanska et al., 1996).

Nous examinerons maintenant les types d'inhibition retrouvés dans la littérature, puis nous présenterons le développement de l'inhibition chez les enfants.

Classifications de l'inhibition

L'inhibition est un processus qui fait généralement partie des théories des FE. Spécifiquement, c'est l'une des trois composantes du modèle de Miyake et Friedman (2012). Toutefois, malgré sa position centrale, l'inhibition n'est pas un construit unitaire et homogène et aucune épreuve neuropsychologique n'en permet une mesure « pure » (Friedman & Miyake, 2004; Miyake & Friedman 2012; Miyake et al., 2000; Nigg, 2000). Ainsi, pour mieux comprendre l'inhibition elle-même, les auteurs suggèrent des distinctions entre différents aspects de l'inhibition selon les processus spécifiques qui sont mis en jeu.

Fonctions liées à l'inhibition

Pour Friedman et Miyake (2004), il est primordial d'en arriver à une compréhension la plus précise possible des subtilités de l'inhibition. Ceci nous permettra ensuite de mieux comprendre les difficultés des personnes atteintes de troubles neuropsychologiques et de mieux cibler les interventions auprès d'eux. Ils proposent donc trois fonctions liées à l'inhibition : l'inhibition d'une réponse dominante (IRD; *Prepotent Response Inhibition*), la résistance aux interférences (RI; *Resistance to Distractor Interference*) et la résistance aux interférences proactives (RIP; *Resistance to Proactive Interference*). Plus précisément, l'inhibition d'une réponse dominante est la capacité de supprimer volontairement une réponse automatique, dominante ou surprise. De son côté, la résistance aux interférences est la capacité de faire abstraction de stimuli ou d'informations externes non pertinents et qui sont présents dans l'environnement simultanément à la tâche à accomplir. Finalement, la résistance aux interférences proactives constitue la capacité de résister à l'intrusion dans la mémoire d'informations auparavant pertinentes à une tâche, mais qui ne le sont plus maintenant. Afin de tester leur théorie, ils ont évalué l'inhibition chez 220 jeunes adultes à l'aide de 9 tests (trois par fonctions; IRD : AS, *Stroop*, *Stop-Signal*; RI : *Eriksen flanker task*, *Word naming*, *Shape matching*; RIP : variante de la tâche *Brown–Peterson*, *AB–AC–AD*, *Cued recall*; voir Tableau 1 en Appendice A). Les résultats démontrent que les corrélations entre les neuf tests sont faibles. Cette grande hétérogénéité entre les tests souligne l'aspect « insaisissable » de l'inhibition. De plus, au terme d'une analyse factorielle, ils concluent que c'est un modèle à deux facteurs qui explique le mieux les

résultats. Un premier facteur regroupe l'inhibition d'une réponse dominante et la résistance aux interférences, un second n'inclut que la résistance aux interférences proactive.

Par ailleurs, dans sa revue de littérature sur la taxonomie de l'inhibition, Nigg (2000) subdivise l'inhibition au point de vue cognitif en quatre sous catégories: l'inhibition des mouvements volontaires (inhiber des mouvements appris en fonction d'une règle changeante), l'inhibition comportementale (ne pas répondre de façon motrice à un stimulus), l'inhibition oculomotrice (ne pas déplacer le regard en direction d'une cible présentée dans le champ visuel) et le contrôle des interférences (maintenir une réponse quand des stimuli distrayants suscitent des réponses motrices différentes).

Dans les pages suivantes, il sera surtout question de l'inhibition d'une réponse dominante, étant donné que les tâches utilisées dans le cadre de l'expérimentation, tant les épreuves psychométriques qu'oculométriques, sont liées à ce type d'inhibition. De plus, il sera principalement question de l'inhibition des mouvements volontaires et de l'inhibition oculomotrice, puisque les tâches utilisées dans le cadre de notre expérimentation, décrites plus loin dans l'article, sont liées à ces deux types d'inhibition.

L'inhibition des mouvements volontaires et l'inhibition oculomotrice. Au point de vue physiologique l'inhibition des mouvements volontaires sollicite le cortex orbito-

préfrontal latéral et l'aire motrice (Nigg, 2000). Les épreuves neuropsychologiques d'inhibition utilisées dans le cadre de la présente recherche, et qui seront décrites dans la section « Méthode », sont toutes des tâches d'inhibition motrice intentionnelle, car elles exigent de l'enfant un contrôle volontaire de ses mouvements, en accord avec des indices contextuels changeants inhérents à la tâche. Deux épreuves de ce type ont été utilisées dans la phase d'expérimentation de la présente recherche (pour une brève description de toutes les épreuves neuropsychologiques mentionnées dans le présent essai, veuillez consulter le Tableau 1 en Appendice A). Tout d'abord, l'épreuve *marche-arrête* (Manly, Robertson, Anderson, & Nimmo-Smith, 2006) et ensuite la tâche *cogner-frapper* (Korkman, Kirk, & Kemp, 2003). Ces deux épreuves impliquent l'inhibition des mouvements volontaires. Dans la tâche *marche-arrête*, l'enfant doit inhiber la réponse fréquente et bien apprise (avancer son crayon d'une case). C'est là un défi important qui, comme il en sera question dans la section sur le développement de l'inhibition, demande beaucoup de ressources cognitives aux enfants les plus jeunes. Dans *cogner-frapper* l'enfant doit d'abord inhiber un comportement appris depuis longtemps (l'imitation) pour apprendre une nouvelle règle. Il doit ensuite inhiber un comportement nouvellement appris (la règle apprise dans la première partie de la tâche) pour agir en fonction d'une nouvelle consigne. Ainsi, dans cette tâche d'inhibition motrice, le contrôle moteur est sollicité dans un contexte où la règle est changeante (Cohen, Aston-Jones, & Gilzenrat, 2004).

De son côté, l'inhibition oculomotrice sollicite les aires visuelles frontales et le cortex orbito-frontal. Le fait qu'elle sollicite des aires cérébrales distinctes de l'inhibition motrice est ce qui amène Nigg (2000) à la considérer comme distincte de l'inhibition des mouvements volontaires.

L'inhibition oculomotrice est généralement évaluée grâce à une tâche d'AS qui sera décrite en détail plus loin. Brièvement, cette tâche consiste à inhiber une saccade réflexive vers un stimulus nouvellement apparu en périphérie de regard et à effectuer une saccade vers le côté opposé à la direction où le stimulus est apparu. Selon Nigg (2000), l'avantage de ces tâches est que les AS ne font pas appel aux fonctions verbales ou motrices. Elles seraient donc une mesure plus précise de la capacité d'inhibition. Malgré leur indépendance relative des fonctions verbales ou motrices, les AS dépendent, au moins minimalement, d'autres FE. En effet, les capacités d'inhiber les saccades oculaires diminuent quand la demande en MdT augmente (Roberts, Hager, & Heron, 1994, cités dans Nigg, 2000).

Les mesures et le développement de l'inhibition

Depuis le début de cet essai, nous avons présenté, défini et classifié les fonctions exécutives de même que l'inhibition. Nous présenterons maintenant la mesure et le développement de l'inhibition selon trois approches différentes utilisées en recherche, soit : l'électrophysiologie, la neuropsychologie et l'oculométrie. La présentation d'une

approche sera suivie de la présentation de notre compréhension du développement de l'inhibition selon cette approche.

L'électrophysiologie. Les études électrophysiologiques étudiant la composante LRP (*Lateralized Readiness Potential*) pendant que des participants complètent une tâche type *Stroop* (Stroop, 1935), démontrent que deux phénomènes se produisent dans la réaction d'inhibition : une réaction précoce (*early process*) et une réaction tardive (*late process*; Bryce, Szűcs, Soltész, & Whitebread, 2011). La réaction précoce serait une phase de suppression des interférences. Ceci signifie que la capacité à filtrer les informations non pertinentes (par exemple, le son régulier dans la tâche *marche-arrête*) serait une réaction précoce. De son côté, la réaction tardive serait l'inhibition de la réponse motrice (ne pas avancer le crayon après avoir entendu le son ne se terminant pas comme les précédents dans la tâche *marche-arrête*). Lorsque le filtrage précoce est efficace, la réaction tardive serait atténuée.

Nous discuterons ici des aspects physiologiques de l'inhibition tels qu'évalués en recherche en électrophysiologie chez les adultes et les enfants, de façon à voir la progression de cette habileté sur le plan neuroanatomique chez les enfants âgés de 5 à 8 ans. La réaction précoce (suppression des interférences) et la réaction tardive (inhibition de la réponse motrice) ne se développeraient pas au même rythme. Dans une tâche d'inhibition similaire au *Stroop* (Stroop, 1935), la réaction précoce serait déjà mature et effective chez les enfants âgés d'à peine 5 ans, tandis que la réaction tardive

serait encore en développement chez les enfants âgés de 8 ans (Bryce et al., 2011) et seulement mature pour ceux qui sont âgés entre 12 et 19 ans (Jongen & Jonkman, 2008). De plus, ces mêmes auteurs ont démontré que ces processus ne dépendent pas de la demande en MdT, mais bien de la demande en inhibition.

La différence entre les deux composantes temporelles de l'inhibition est soutenue par l'étude de Gandolfi, Viterbori, Traverso et Usai (2014) : chez les 24-32 mois, un modèle à une variable (inhibition) explique les données, tandis que chez les 36-48 mois, un modèle à 2 variables (suppression des interférences et inhibition de la réponse) explique les résultats. Ainsi, les jeunes âgés de moins de 3 ans ne présenteraient qu'un niveau de performance semblable pour les deux processus, mais chez ceux âgés de 3 ans et plus, les deux processus seraient déjà différenciés.

Il apparaît que les tâches d'inhibition exercent une demande cognitive maximale et constante pour les enfants. Christ, White, Mandernach, et Keys (2001) ont utilisé une tâche d'inhibition motrice simple auprès d'adultes (un groupe de participants âgés entre 17 et 22 ans et un autre groupe de participants âgés entre 61 et 82 ans) et d'enfants (âgés de 6 à 15 ans). La tâche prévoyait que, dans la condition de départ, le participant appui sur un bouton situé du même côté que le stimulus tandis que dans la condition d'inhibition, il doit appuyer sur un bouton situé du côté opposé au stimulus. Dans cette tâche, les enfants font un nombre plus important d'erreurs que les adultes. De plus, lors des essais réussis par les enfants, la réponse physiologique est toujours maximale. Dans

les deux groupes, les réponses d'inhibition correctes activent les mêmes aires cérébrales (préfrontale et pariétale). Pour les adultes, l'intensité varie selon la quantité d'essais où ils ont répondu avant d'avoir à inhiber leur réponse. En effet, plus la dernière réponse inhibée est récente, moins l'ampleur de la réponse d'inhibition suivante est importante. Toutefois, cette diminution n'est pas observée chez les enfants qui présentent toujours une réponse maximale. Cette demande toujours maximale chez les enfants entraînerait une grande sollicitation cognitive. Les auteurs discutent du fait que c'est probablement ce qui expliquerait la susceptibilité des enfants aux erreurs (Durstun et al., 2002).

Barry et De Blasio (2015) ont conduit une recherche auprès de 40 enfants âgées de 8 à 13 ans grâce à un paradigme demandant de l'inhibition motrice : le *go/no-go*. Leurs résultats suggèrent que les enfants qui parviennent le mieux à inhiber un comportement moteur simple sollicitent des processus cognitifs qui ne sont plus nécessaires à l'âge adulte (la composante N2b dont font preuve les enfants qui réussissent bien à la tâche n'est pas enregistrée chez les adultes, amenant les auteurs à conclure que la réaction « d'inhibition » enregistrée chez les enfants n'est pas perçue chez les adultes car ceux-ci présenteraient plutôt de « l'indifférence »). Ceci démontre donc l'ampleur relativement importante de l'effort cognitif qui est encore nécessaire aux enfants afin d'inhiber un comportement.

Torpey, Hajcak, Kujawa et Klein (2012) ont étudié 328 enfants âgés de 5 à 7 ans et demi. Les enfants ont complété un paradigme *go/no-go* pour que soit évaluée leur

réaction lorsqu'ils commettent des erreurs. Chez ce jeune échantillon, la localisation cérébrale et le déroulement des potentiels évoqués étaient les mêmes que ce qui est observé chez les adultes. Malgré le peu d'écart entre les plus vieux et les plus jeunes de l'échantillon (seulement 2 ans), des améliorations significatives de la précision et des temps de réaction ont été observées. De plus, les enfants qui présentaient l'onde négative (*Error-related negativity*; ERN) la plus importante étaient aussi ceux qui réussissaient le mieux. Toutefois, contrairement à ce qui est habituellement observé chez les adultes, ceux qui avaient une réaction importante à leurs erreurs ne s'amélioraient pas de manière significative au fil des essais. Ceci suggère donc que les enfants qui ont une réaction électrophysiologique importante suite à leurs erreurs d'inhibition, commettent au total moins d'erreurs. Toutefois, la conscience de leurs erreurs n'améliore pas leurs performances par la suite. Notons ici que le quart des participants ont dû être exclus pour avoir commis un nombre trop important d'erreurs, ce qui suggère une prudence dans l'analyse de ces résultats.

De façon générale, les études utilisant les mesures électrophysiologiques s'avèrent une voie qui permet d'enrichir les connaissances sur des phénomènes du développement en intégrant les données comportementales et les données neurophysiologiques (Saby, & Marshall, 2012). Néanmoins, il est important de considérer les difficultés logistiques qu'implique l'utilisation d'un casque d'électrodes sur des jeunes enfants (Stets, Stahl, & Reid, 2012). C'est probablement ce qui explique le petit nombre de telles études chez les jeunes enfants. Toutefois, les études mentionnées ici éclairent le développement de

l'inhibition chez les enfants présentant un DT et sur les processus physiologiques qui la sous-tendent. Les informations qu'elles procurent sont d'une richesse importante et, bien que ces informations soient recueillies dans le contexte expérimental d'un laboratoire qui ressemble en bien peu de choses à l'environnement quotidien des enfants, elles permettent de donner des pistes intéressantes de recherche et d'intervention aux chercheurs et aux cliniciens.

La neuropsychologie clinique. Les tests psychométriques permettent d'évaluer les capacités cognitives d'un participant en étudiant son comportement face à des tâches. Les performances du participant sont ensuite comparées à celles d'un échantillon normatif de participants du même groupe d'âge. Ces tests neuropsychologiques administrés en clinique ont habituellement été validés avec des échantillons importants et font preuve d'une bonne fidélité.

L'évaluation neuropsychologique comporte plusieurs défis. Tout d'abord, la meilleure façon de tester les FE d'un sujet est de lui présenter des tâches complexes et nouvelles. Néanmoins, peu importe la tâche choisie, il demeure possible que ce qui est nouveau et complexe pour une personne ne le soit pas pour une autre (Sohlberg, & Mateer, 2001). Ensuite, selon Kaplan (1988), un aspect important à considérer quant aux tests neuropsychologiques demeure qu'il est probable qu'un test destiné à mesurer une fonction cognitive mesure aussi d'autres capacités (perception des couleurs, lecture, vitesse motrice, etc.). En ce sens, un test qui décortique la performance est plus

intéressant qu'un test au terme duquel on obtient un seul score. Par exemple, le test *marche-arrête* de la batterie Test d'évaluation de l'attention chez l'enfant (TEA-CH; Manly et al., 2006) permet d'obtenir un score simple d'inhibition. En revanche, le sous-test *inhibition* de la Nepsy 2 (Korkman, Kirk, & Kemp, 2012) permet d'isoler la rapidité de dénomination des formes avant de mesurer la capacité d'inhibition elle-même. De cette manière, un enfant qui démontre une vitesse de dénomination dans la moyenne et une vitesse d'inhibition dans la moyenne montre une performance tout à fait normale. Toutefois, un deuxième enfant qui fait preuve d'une vitesse de dénomination plus rapide que la moyenne et une vitesse d'inhibition dans la moyenne montre un ralentissement dû à une faible inhibition dans la deuxième condition. Ceci démontre donc une diminution de la performance due à une faible inhibition, en dépit d'un score identique dans la condition d'inhibition. Ce sous-test est donc plus précis que la tâche *marche-arrête* pour mesurer la capacité d'inhibition.

Il apparaît donc essentiel d'utiliser les évaluations les plus complètes possibles, avec des mesures riches en nuances, qui permettent d'extraire au maximum les variables confondantes. De plus, utiliser des tests qui correspondent à l'âge spécifique des participants évite l'effet plafond (les participants performant tous de façon optimale) et l'effet plancher (les participants sont tous incapables d'accomplir une tâche et obtiennent tous le score minimal).

Évaluation de l'inhibition en neuropsychologie clinique. En neuropsychologie clinique, il existe différentes approches pour évaluer les FE. L'une d'entre elles est d'administrer des questionnaires aux proches d'un sujet pour mesurer ses FE dans le cadre de ses activités quotidiennes. Malgré la validité écologique de ces questionnaires, leurs résultats corréleront généralement de façon modeste avec les résultats aux tests neuropsychologiques conventionnels (Anderson, Levin, & Jacobs, 2002). En raison de la subjectivité des évaluateurs, ce type de mesure est rarement employé en recherche, bien que son apport dans l'évaluation neuropsychologique globale d'un enfant soit important en pratique clinique (Sohlberg & Mateer, 2001).

L'approche principale en neuropsychologie demeure toutefois l'utilisation de tests et de tâches standardisés qui mesurent le plus directement possible les capacités du participant (Garon et al., 2008). Il existe un grand nombre de tests standardisés pour évaluer les capacités d'inhibition des adultes. Généralement, ceux-ci sont complexes et nécessitent la résolution de plusieurs opérations mentales. Pour les enfants, comme nous l'avons déjà vu, on tente de simplifier les épreuves de manière à ce qu'elles demandent le moins de ressources possible en MdT. En effet, les performances des enfants aux tests psychométriques sont tout particulièrement influencées par les processus de bas niveau, comme la perception visuelle, les habiletés motrices et la vitesse de traitement de l'information (Smidts, 2003). Chaque test, par sa sensibilité et sa spécificité qui lui sont propres, contribue à d'établir le profil précis des forces et des faiblesses d'un enfant. Ainsi, une panoplie de tâches est nécessaire pour bien cerner les capacités d'inhibition

des enfants. En effet, les plus jeunes enfants n'ont pas les capacités ni les connaissances nécessaires pour accomplir les tâches que les plus vieux peuvent accomplir, cependant, les tâches que les plus jeunes accomplissent sont trop simples pour bien saisir les capacités d'inhibition des plus vieux. À cet effet, on peut classer les tests d'inhibition employés auprès des enfants en tâches simples et complexes, puis *chaudes* et *froides*.

Épreuves simples et épreuves complexes. Dépendamment de l'âge des participants et des objectifs des épreuves, leur complexité est hautement variable. De manière générale, plus une tâche est simple, plus il est probable que des enfants jeunes la réussissent. Il y a donc des tâches extrêmement simples, comme *statue* et d'autres tâches beaucoup plus compliquées, comme *cogner-frapper*. La plupart des tâches d'inhibition demandent un minimum de MdT (le participant doit se souvenir d'au moins une consigne). Comme nous l'avons déjà mentionné, la MdT est considérée comme une autre FE. Ainsi, Garon et ses collègues (2008) séparent les tâches d'inhibition en deux groupes, soit les tâches d'inhibition simples (celles qui demandent peu de ressources à la MdT), et les tâches d'inhibition complexes (celles qui demandent plus de ressources de la MdT).

Les tâches d'inhibition simples sont le plus souvent utilisées avec les enfants de moins de 7 ans. En effet, les enfants plus âgés éprouvent généralement une grande facilité à accomplir des tâches aussi peu complexes et leur performance plafonne rapidement, ce qui rend ces tests peu sensibles auprès de cette population. De son côté,

l'inhibition complexe demande de retenir une règle en MdT et de l'exécuter par la suite, au lieu de d'émettre la réponse surapprise (dans le contexte d'une tâche d'inhibition de réponse dominante). Les performances à ce genre d'épreuves varient grandement en fonction de la demande en capacités langagières (par exemple, avoir accès au langage pour pouvoir retenir la consigne, savoir lire, etc.) et en connaissances sémantiques (par exemple, savoir que le gazon est vert et que la neige est blanche, pouvoir nommer des formes et des couleurs, etc.; Garon et al., 2008). Dans la littérature sur le sujet, il est donc souvent mentionné qu'à ce genre d'épreuves, les performances varient grandement en fonction des capacités langagières et des connaissances sémantiques des participants (Garon et al., 2008).

Inhibition chaude et inhibition froide. Des auteurs (Zelazo & Carlson, 2012) font également la différence entre les FE *chaudes* (*hot*) et les FE *froides* (*cool*). Lorsque la motivation est présente, il est question de FE *chaudes* (par exemple, des tâches où la récompense est une friandise que l'enfant est intéressé à manger). Quand les tâches présentent un contexte émotif neutre, il est plutôt question de FE *froides* (par exemple, des tâches où l'enfant doit classer des objets en fonction de critères, comme la couleur ou la grosseur). Les recherches démontrent que les FE *chaudes* et *froides* sont distinctes et qu'elles se développent de manière différente et à un rythme qui leur est propre (Hongwanishkul, Happaney, Lee, & Zelazo, 2005). Dans la présente recherche, nous présenterons principalement les données sur les FE *froides*, étant donné que les tâches utilisées dans le cadre de l'article qui suit sont toutes *froides*. Il est néanmoins pertinent

d'ajouter que, généralement, même s'ils parviennent à accomplir des tâches *froides* avec succès, les enfants éprouvent de la difficulté à accomplir des tâches où la motivation émotionnelle est élevée. En ce sens, des chercheurs ont évalué que lorsque la consigne d'une tâche *chaude* est formulée de manière *froide*, les enfants arrivent à mieux performer. Par exemple, des enfants âgés de 3 ans, qui ne parvenaient pas à inhiber leur réponse automatique de pointer vers un plateau avec beaucoup de bonbons, y parviennent significativement mieux lorsque le comportement à inhiber est de pointer vers un plateau avec des images d'animaux (Carlson, 2005).

Développement de l'inhibition selon la neuropsychologie clinique. Tel que mentionné plus haut, nous allons maintenant présenter le développement de l'inhibition chez les jeunes de la naissance à l'adolescence. Les résultats présentés proviennent de recherches où les étendues d'âges des participants dans les différents groupes à l'étude sont rarement réparties de la même manière. Nous tenterons tout de même de présenter ces résultats en ordre chronologique d'âge des participants, de manière à tracer un portrait longitudinal du développement d'un enfant. Tel que spécifié plus haut, nous présenterons, à quelques exceptions près, seulement les connaissances issues de tâches où l'inhibition sollicitée était *froide* (avec un faible contenu émotionnel) et où la réponse motrice et le niveau de difficulté sollicités étaient relativement simples. Concernant ce dernier point, comme il a déjà été mentionné, pour les enfants plus âgés, les tâches sont généralement plus complexes, de manière à éviter le plafonnement des performances. Pour alléger le texte, les méthodologies employées dans les études présentées sont

décrites plus loin. Pour une description de chaque tâche, veuillez consulter le Tableau 1 en Appendice A.

0 à 3 ans. Le développement de l'inhibition est central au développement des FE. Selon Zelazo & Müller (2011), la première manifestation des FE chez l'enfant est l'apparition du contrôle conscient des pensées, des actions et du comportement. Cette capacité apparaît dès 8 mois quand l'enfant a acquis la permanence de l'objet (Piaget, 1952) et qu'il commence à chercher des objets dissimulés devant lui après avoir attendu un bref délai. D'autres tâches sont aussi employées, mais la majorité s'inspire tout de même de la théorie piagétienne, sont simples et requièrent peu de capacités en MdT (Smidts, 2003).

Ainsi donc, dès la première année, les enfants parviennent à compléter des épreuves d'inhibition simples. La capacité d'arrêter de toucher un jouet attrayant lorsque le parent dit « ne touche pas » est l'une des premières tâches effectuées et qui démontre une capacité d'inhiber le comportement de jouer avec ce jouet. Les poupons de 8 mois inhibent ce comportement d'inhibition *chaude* 40 % des fois (Kochanska, Tjebkes, & Forman, 1998), tandis que ceux de 22 mois l'inhibent 78 % des fois et ceux de 33 mois l'inhibent 90 % des fois (Kochanska, Murray, & Harlan, 2000). Il apparaît aussi que la capacité des enfants à répondre à : « Ne fais pas ceci, » précède à la capacité de répondre à : « Fais ceci ». Il semble donc que dès leur première année, et ce, jusqu'à leur

troisième année de vie, les enfants sont progressivement plus aptes à inhiber un comportement intéressant à la demande verbale d'un de leurs parents.

Diamond (1990) a créé une tâche d'inhibition novatrice. Il s'agit d'une tâche de récupération d'un objet dans un contenant translucide. L'enfant doit inhiber une solution inefficace (tenter de saisir l'objet par le haut du contenant) pour trouver une solution alternative (saisir l'objet par un trou caché sur le côté du contenant). Grâce à cette épreuve, la chercheuse démontre que les enfants de 6,5 mois ne trouvent pas la solution sans support parental. Ce ne sera qu'après l'âge de 12 mois que les enfants sont capables de saisir l'objet par eux-mêmes, sans assistance.

Chez les enfants les plus jeunes, un paradigme bien connu de l'évaluation de l'inhibition est la tâche *A-Non-B* (Piaget, 1954). En accomplissant cette tâche, les enfants âgés de 8 mois commettent l'erreur de rechercher l'objet dissimulé à l'endroit où ils l'ont vu caché lors des essais précédents, en dépit du fait qu'ils l'ont vu être dissimulé à un endroit différent lors de l'essai en cours. Ainsi, une erreur *A-non-B* est commise lorsque l'enfant persévère à tenter de retrouver l'objet à l'emplacement précédent (A) quand l'objet est dissimulé au nouvel endroit (B) (Diamond & Goldman-Rakic, 1985). Cette erreur de persévérance du comportement dû à un manque d'inhibition s'estompe progressivement entre 7 et 12 mois. Ainsi, plus les enfants vieillissent, plus ils se souviennent correctement de l'emplacement de l'objet caché malgré le délai qui s'allonge entre la dissimulation et le moment du rappel, et ils parviennent à inhiber la

réponse antérieure (Diamond & Goldman-Rakic, 1985). Il apparaît donc que l'incapacité d'inhiber le comportement appris et pertinent précédemment nuit aux capacités de MdT. Ainsi, pour les très jeunes enfants, l'incapacité d'inhiber des comportements nuit à l'acquisition de nouvelles connaissances.

Une tâche similaire à la tâche *A-non-B*, et bien reconnue, est la tâche de réponse différée (*Delayed Response task*; Smidts, 2003). Cette épreuve sollicite principalement la MdT, mais aussi l'inhibition (Diamond, & Doar, 1989). L'amélioration des performances dans la tâche de réponse différée est mesurée par la durée de temps d'attente que l'enfant peut supporter avant de se souvenir de l'endroit où l'objet a été dissimulé. À 7 mois et demi, les enfants réussissent seulement après un délai d'à peine 2 secondes, tandis qu'à 12 mois, ils y arrivent après un délai de 10 secondes (Diamond & Doar, 1989). Malgré la différence méthodologique entre la tâche *A-non-B* et la tâche de réponse différée, les performances des enfants sont presque identiques aux deux tâches. Il est donc possible que dès la première année, les capacités de MdT et d'inhibition de l'enfant se développent rapidement et parallèlement (Smidts, 2003).

Les tâches de gratification différée ont une place importante dans la recherche et nous les présenterons brièvement même si elles sont connues pour être des tâches d'inhibition *chaudes*. Ces tâches représentent une mesure pertinente pour les enfants âgés de 2 à 4 ans, qui pourraient être moins motivés à accomplir une tâche d'inhibition *froide*. Les performances à ces tâches plafonnent rapidement chez les enfants âgés de

plus de 4 ans (Garon et al., 2008). Il ressort donc de ces études, en somme, que 50 % des enfants âgés de 2 ans peuvent attendre 20 secondes tandis que 85 % des enfants âgés de 3 ans peuvent attendre 1 minute. L'accès au langage ouvre d'autres possibilités pour les enfants qui doivent inhiber des comportements fortement motivés (Manfra, Davis, Ducenne, & Winsler, 2014). Dans une tâche d'inhibition *chaude*, où les enfants de 3 et 4 ans ont pour consigne de ne pas toucher à un train attrayant, ceux qui réussissent le mieux à inhiber ce comportement lorsqu'ils sont laissés seuls dans une pièce sans surveillance apparente d'adulte, sont ceux qui se parlent à eux-mêmes pendant le délai d'attente. Il est donc possible de constater que les jeunes enfants peuvent inhiber un comportement attirant de plus en plus longtemps entre les âges de 2 et 4 ans, et que l'accès au langage facilite cette inhibition.

Lors de la tâche de Carlson (2005) *Catégorisation inversée*, seulement 20 % des enfants de 2 ans réussissent à accomplir la deuxième phase de l'expérimentation, soit de ne mettre que des petits blocs dans la grande chaudière et que des gros blocs dans la petite chaudière. De leur côté 85 % des enfants de 3 ans réussissent. Ainsi, les enfants de 2 ans ne sont pas capables d'inhiber le comportement préalablement appris et qui paraît plus naturel (mettre les gros objets dans le gros récipient). Toutefois, les enfants âgés d'une année de plus parviennent à faire abstraction de la réponse apprise et plus naturelle.

Dans une épreuve présentée sous la forme du jeu du dragon et de l'ours (Carlson, 2005), il est possible de constater que la capacité d'inhiber les comportements dictés verbalement selon une double consigne se développe chez les enfants âgés de 3 à 5 ans. Ainsi, chez les jeunes de 3 ans, seulement 51 % des enfants réussissent à suivre les consignes provenant de la source pertinente et à inhiber les actions commandées par la source non pertinente. Dès l'âge de 4 ans, les enfants réussissent à 76 %, alors que ce sont 100% des enfants qui parviennent à réussir la tâche lorsqu'ils ont atteint l'âge de 5 ans.

Dans une autre tâche similaire (*tour*), où l'enfant doit attendre son tour avant d'agir, 24 % des jeunes âgés de 3 ans réussissent, tandis que 67 % des jeunes âgés de 4 ans y arrivent (Carlson, 2005). Les résultats de ces deux épreuves démontrent donc que les enfants parviennent progressivement, au fil de leur développement, à mieux suivre une consigne qui demande d'inhiber des actions lorsque c'est pertinent et d'agir lorsque la consigne l'indique.

Il apparaît donc que l'inhibition ne se développe pas de façon isolée des autres FE. Elle se développe plus ou moins parallèlement à la MdT et, éventuellement, à la flexibilité. Il est tout de même possible de constater la place importante de la capacité d'inhiber dans la résolution de problèmes chez les enfants. Zelazo, Müller, Frye et Marcovitch (2003), qui ont principalement étudié des enfants âgés de 3 à 4 ans, concluent que chez les enfants en âge préscolaire, les FE sont unitaires. Ainsi, à partir de

2 ans, les enfants peuvent résoudre des problèmes de plus en plus complexes grâce à l'acquisition du langage (Zelazo & Müller, 2011). En effet, le nombre de gestes communicatifs émis à 15 mois et le vocabulaire expressif à 2 et 3 ans sont corrélés avec les performances à des épreuves évaluant les FE (Kuhn, Willoughby, Wilbourn, Vernon-Feagans & Blair, 2014). Ainsi, à 3 ans, les enfants peuvent catégoriser des cartes selon 2 règles arbitraires qu'ils ont mémorisées (par exemple: mettre des images de choses qu'on retrouve à l'intérieur d'une maison dans un premier panier, et les images d'objets qu'on retrouve à l'extérieur dans un deuxième panier). Les enfants de 2 ans et demi n'arrivent pas à accomplir cette tâche: ils persèverent à n'appliquer qu'une des deux règles. Pour arriver à appliquer deux règles contradictoires, l'enfant doit inhiber sa réaction à un aspect saillant de la carte et se souvenir des règles mémorisées. À 3 ans, un enfant parvient à accomplir cette tâche. Toutefois, si on change la règle en cours de tâche, l'enfant persévère à catégoriser selon les premières règles apprises. Il semble donc que, bien qu'il réussisse à mémoriser les consignes dans un premier temps, il ne parvient pas à mettre la règle à jour et à inhiber l'ancien comportement. Les enfants de 4 ans arrivent à inhiber cette réponse et suivent la dernière règle apprise. Cette capacité d'inhiber une réponse aux stimuli saillants apparaît chez les enfants âgés d'à peine 3 ans et démontre que l'inhibition apparaît tôt et qu'elle revêt une importance prépondérante dans le développement. De plus, cette progression démontre aussi la relation entre les FE entre elles. En effet, pour accomplir cette tâche, l'enfant doit inhiber le comportement, mais il doit aussi se souvenir de la règle (MdT) et passer d'une règle à l'autre (flexibilité).

Toujours selon Zelazo et Müller (2011), le développement des capacités des enfants leur permet de progresser et d'arriver à ne plus réagir seulement aux stimuli présents dans l'immédiat. Ils parviennent donc à se souvenir du passé et à envisager plusieurs options possibles dans le futur. Ainsi, au moment opportun, les enfants plus âgés réussissent, face à un stimulus reconnu, à mettre en place une réponse possible et à inhiber les autres. Cette habileté facilite la résolution de problèmes de plus en plus complexes auxquels l'enfant devra faire face à son arrivée à l'école.

Bien que Zelazo et ses collègues (2003) prétendent que les FE sont unitaires chez les jeunes enfants, Jenkins et Berthier (2014), qui ont évalué des enfants de 2,5 à 3 ans, avancent qu'il y a bel et bien un effet différent des capacités de résolution de problèmes qui s'explique spécifiquement par les capacités d'inhibition et non pas par les capacités de MdT. Berthier, DeBlois, Poirier, Novak et Clifton (2000) avaient mis au point un dispositif demandant à de jeunes enfants de raisonner sur les conséquences d'actions invisibles ayant un résultat visible et attrayant (tâche de la porte; voir Figure 1). Chez les enfants de 2 ans, 22 % trouvaient la bonne réponse au premier essai tandis que pour les enfants de 3 ans, le résultat était de 74 %. Dans leur discussion, les auteurs soulevaient la possibilité que ce soit les capacités de MdT ou d'inhibition qui expliquent ces résultats, mais ils ne pouvaient pas statuer définitivement. C'est pour mieux comprendre la raison de cette amélioration radicale des performances qu'une autre équipe de chercheurs (Jenkins & Berthier, 2014) ont employé la même tâche, en prenant soin d'y ajouter des

tests qui sondaient la MdT et une tâche qui évaluait la capacité d'inhibition (tâche des goujons). Il en résulte qu'en effectuant des corrélations entre la tâche de raisonnement et les quatre autres épreuves, seule la performance à la tâche d'inhibition corrélait significativement et fortement avec les performances à la première. Ceci suggère donc que pour résoudre un problème complexe, la capacité d'inhiber les réponses erronées est plus pertinente que la capacité de maintenir en mémoire de travail les aspects perçus de la tâche.

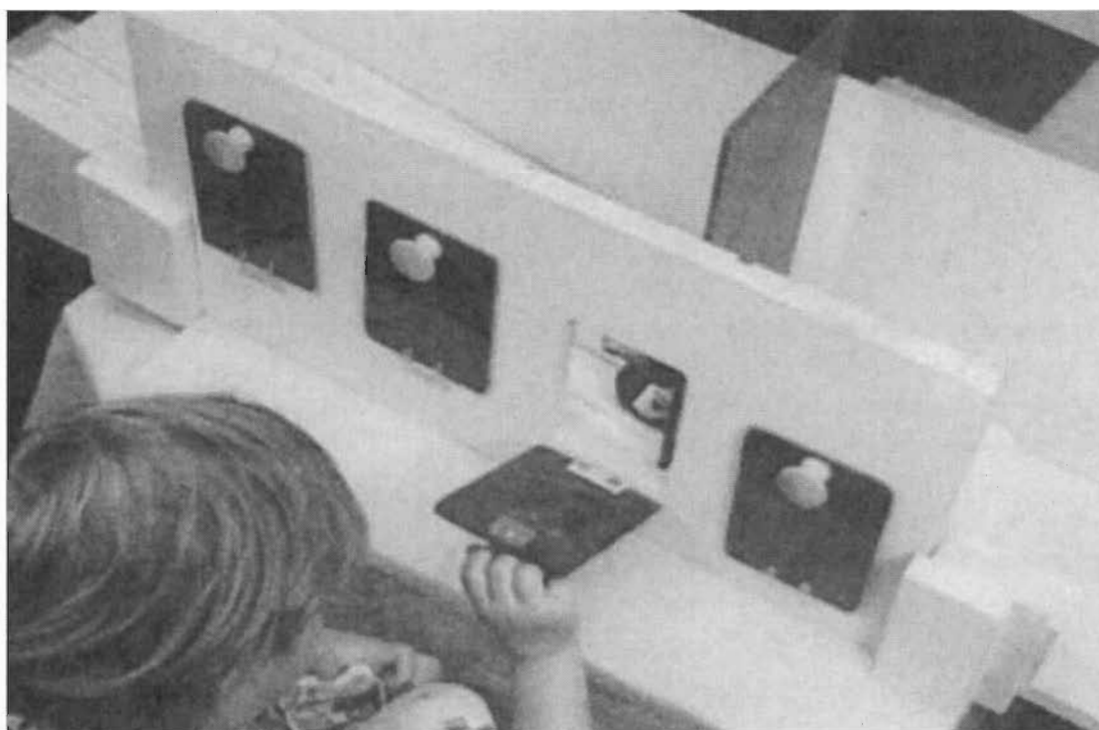


Figure 1. Tâche de la porte (*The Door Task*). L'enfant voit une balle descendre une rampe qui passe derrière 4 portes opaques. Le lieu d'arrivée de la balle est donc dissimulé, mais l'enfant voit le haut d'une planchette qui arrête la balle, derrière l'une des portes (Berthier et al., 2000).

4 à 5 ans. Chez les enfants de 4 à 5 ans en période préscolaire, les tâches d'inhibition présentées nécessitent généralement un minimum de MdT (Smidts, 2003). Les tâches employées avec ce groupe d'âge sont soit des tâches adaptées de tâches pour adultes, soit des tâches employées dans le milieu de la recherche, soit encore de nouvelles tâches créées de toutes pièces.

Auprès des enfants de ce groupe d'âge, le développement de l'inhibition sous ses aspects *chauds* et *froids* a été évalué lors d'une recherche longitudinale par l'intermédiaire d'une grande variété de tâches. Ces tâches étaient présentées sous forme de défis et exigeaient une capacité de patienter avant de recevoir une récompense (gratification différée), de ralentir des comportements (motricité fine et globale), d'inhiber des comportements moteurs suite à une commande et d'éviter de tricher dans des situations où c'eût été facile de le faire (Kochanska et al., 2000). Cette recherche suggère que les profils de performances pour chaque enfant, entre le premier et le deuxième temps de mesure, démontrent une grande stabilité des résultats au niveau individuel, même si les performances d'un enfant s'amélioraient avec le développement (les enfants gardaient relativement la même position les uns par rapport aux autres). Ceci tend à démontrer que l'inhibition serait un processus relativement stable chez les individus.

Diamond et Taylor (1996) ont utilisé une tâche inspirée de Luria (1966). Ils constatent qu'en âge préscolaire, les participants deviennent significativement plus rapides et plus précis entre les âges de 3,5 et de 7 ans. En utilisant une épreuve de type *go/no-go*, épreuve d'inhibition motrice simple, Simpson et Riggs (2005) constatent que la progression du développement de l'inhibition semble suivre une droite ascendante, mais avec quelques bonds de progression plus marquée entre certains âges qui varient en fonction de la modalité de présentation des tâches, principalement dans le groupe des enfants de 3 ans. Ce pourrait donc être autour de la période du troisième anniversaire que, pour un grand nombre d'enfants, les capacités d'inhibition s'améliorent d'un coup en faisant un bond en avant.

Une autre tâche relativement complexe et similaire au *Stroop*, la tâche *Neige-Gazon* (Carlson, 2005), a été employée pour tester un groupe d'enfant de 3 à 4 ans et demi. Cette tâche est un peu plus difficile que celles présentées jusqu'ici, car elle demande plus de connaissances sur les champs sémantiques et les mots associés. Les enfants doivent connaître les noms des couleurs et savoir que le blanc est associé à la neige et le vert au gazon. Dans ce contexte de demande de connaissances verbales élevées, les enfants de 3 ans réussissent dans 45 % des essais, tandis que ceux de 4,5 ans réussissent à répondre correctement dans 80 % des essais. Il apparaît donc que dans le contexte d'une tâche plus exigeante qu'une simple tâche d'inhibition motrice, l'amélioration des capacités d'inhibition des enfants est particulièrement notable après 3 ans. Selon l'auteur, ceci suggère que la capacité d'inhiber un comportement moteur ou une réponse

verbale s'améliore vers l'âge de 3 ans et que cette amélioration affecte un grand nombre de modes de réponses.

Dans la même veine que la tâche nommée précédemment, la tâche *jour-nuit* (en anglais *Day night*) s'inspire aussi de la tâche de *Stroop* (Carlson, 2005; Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994; McAuley, Christ, & White, 2011; Simpson & Riggs, 2005; Simpson et al., 2012). Cette tâche fut administrée au fil des études à des enfants de 3,5 ans à 11 ans. De manière générale, les enfants s'améliorent constamment entre ces âges, mais c'est entre 3,5 ans et 5 ans que l'amélioration est la plus marquée. Encore une fois, certains de ces chercheurs ont voulu savoir si c'est l'inhibition de la réponse dominante qui influence le plus les performances ou si c'est plutôt la capacité de la MdT nécessaire à retenir la double consigne qui rend la tâche plus facile au fil de la croissance (Simpson & Riggs, 2005; Simpson et al., 2012). Leur étude a démontré une fois de plus que c'est bel et bien l'inhibition qui explique les difficultés des enfants à cette tâche. Les résultats d'une étude subséquente démontrent que pour les enfants de 4 ans, la relation sémantique (les mots font partie de la même catégorie) n'est pas importante, c'est seulement quand un mot lui-même fait partie des réponses possibles qu'il est plus difficile à inhiber. Il est donc possible de constater que, dans cette étude, c'est bel et bien la demande d'inhibition et les apprentissages antérieurs qui affectent la performance, et non pas les capacités de la MdT ou les relations catégorielles des mots pertinents et non pertinents.

Dans cette même étude et avec ce même paradigme, les auteurs ont évalué que lorsqu'ils profitent d'un délai entre la fin de l'essai et le moment de répondre, les enfants de 3 ans parviennent plus facilement à inhiber la réponse incorrecte et à émettre la réponse correcte (Diamond, Kirkham, & Amso, 2002). Étant donné que pendant ce délai les enfants devaient écouter l'examineur qui chantonnait, les auteurs prétendent que c'est le simple délai, et non pas un temps de plus pour réfléchir à la bonne réponse, qui contribue à la bonne performance des enfants (Diamond, 2013). Ainsi, il semblerait qu'une fois le moment de la réponse surprise écoulé, la réponse correcte serait plus facile à émettre pour les jeunes enfants âgés de 3 ans.

Dans une étude des FE, Smidts (2003) a utilisé trois épreuves pour évaluer l'inhibition chez des enfants de 3 à 7 ans (Espy, 1997). Une de ces tâches était la tâche de *l'école des formes* qui évalue la flexibilité en plus de l'inhibition. Les analyses révèlent une amélioration significative des performances des enfants âgés de 4 à 5 ans, tant en ce qui concerne les temps de réponse qu'au nombre de réponses correctes. Ainsi, il n'y avait pas de différence significative pour les enfants de 3 à 4 ans en ce qui a trait à la précision des réponses. Toutefois, les enfants de 4 ans répondaient plus rapidement. Ceci semble démontrer qu'à 4 ans, l'inhibition à cette tâche devient plus facile et demande probablement progressivement moins d'énergie cognitive.

Klenberg, Korkman et Lahti-Nuuttila, (2001) ont employé deux tâches pour évaluer l'inhibition dans sa recherche sur le développement des FE auprès d'enfants âgés entre 3

et 12 ans : la tâche *statue* et *cogner-frapper* (Korkman et al., 2003). Encore une fois, les performances à ces tâches augmentent grandement entre les âges de 3 et 5 ans, et plafonnent par la suite. À ces tâches relativement simples d'inhibition motrice, les enfants arrivent donc à réussir comme les enfants âgés de 12 ans, et ce, dès l'âge de 6 ans (Smidts, 2003).

Wiebe, Sheffield et Espy (2012) ont étudié le développement de l'inhibition en utilisant une version de la tâche *go/no-go* où les enfants ont été testés à plusieurs reprises entre les âges de 3 et 5 ans. Les auteurs notent que la précision des réponses (pourcentage de bonnes réponses) augmente graduellement avec l'âge, mais les temps de réponse sont plus lents chez les jeunes qui donnent des réponses précises et diminuent entre les âges de 3 ans et 5 ans. Ils interprètent ces résultats en avançant que les enfants les plus jeunes doivent ralentir leur réponse pour améliorer leur précision. Ceci impliquerait que les plus jeunes doivent fournir un effort cognitif supérieur pour réussir et que la capacité d'inhiber les réponses motrices simples est plus facile avec l'avancement en âge.

6 à 12 ans. En âge scolaire, les tâches utilisées pour évaluer l'inhibition sont souvent les mêmes que celles utilisées en âge préscolaire. De plus, les épreuves employées pour évaluer les enfants de ce groupe d'âge sont de plus en plus fréquemment des tâches psychométriques normées auprès de larges échantillons et disponibles aux professionnels du domaine (Smidts, 2003). Ainsi, selon cet auteur, des batteries de tests

neuropsychologiques standardisés rendent plus facile l'évaluation des FE en général et de l'inhibition en particulier comme, par exemple, la NEPSY (où les sous tests *statue* et *cogner-frapper* sont normés de 5 à 12 ans; Korkman et al., 2003) et la NEPSY-II (où le sous test nommé *inhibition* est normé de 5 à 16 ans et *statue* de 5 à 6 ans; Korkman et al., 2012), la Delis-Kaplan executive function system (D-KEFS; normée à partir de 8 ans; Delis, Kaplan, & Kramer, 2001), la Test d'évaluation de l'attention chez l'enfant (normée en entier de 7 à 16 ans; Manly et al., 2006) et des tâches comme *cartes avec changement de règle* de la batterie *Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome for Children* (BADS-C; normée de 8 à 15 ans; Emslie, 2003). Le grand avantage des tests mentionnés ici est qu'ils sont normés auprès d'importants échantillons standardisés. Ceci permet une meilleure comparaison entre les épreuves, ce qui n'est pas possible avec les tâches expérimentales. Des batteries plus complètes comme la NEPSY et la NEPSY-II présente l'avantage de permettre des comparaisons entre les FE en plus de rendre possible des comparaisons avec d'autres domaines cognitifs des enfants (habiletés visuospatiales, mémoire, praxies, etc.).

Davidson, Amso, Anderson et Diamond (2006) ont mené une recherche auprès de participants de 4-13 ans, ainsi que d'un groupe de jeunes adultes à l'aide d'un paradigme *go/no-go*. Ils ont conclu que plus les enfants sont jeunes, plus c'est l'augmentation de la demande en inhibition qui affecte leurs performances, tandis que pour les adultes, c'est l'augmentation de la demande en MdT qui influence le plus les performances. Ils ont aussi remarqué que pour les enfants, les impacts de l'augmentation de l'exigence des

tâches est une augmentation du nombre d'erreurs, tandis que chez les adultes, l'impact de la même augmentation est une majoration des temps de réponse. Ainsi, face à la demande, les enfants sont plus impulsifs et commettent des erreurs, tandis que les adultes ralentissent, en performant toutefois avec une tout aussi bonne qualité des réponses. Également, plus les enfants sont jeunes, plus l'emplacement sur l'écran des stimuli présentés affecte leur capacité d'inhibition. Ainsi, résister à répondre du même côté que le stimulus est plus difficile pour les enfants plus jeunes. Chez les enfants, l'inhibition demande donc plus de ressources cognitives que chez les adultes, et les enfants se montrent plus sensibles aux caractéristiques secondaires de la tâche (emplacement dans l'espace). La différence entre les groupes suggère que la fragilité de l'inhibition présente chez les enfants s'estompera progressivement au fil de leur développement.

Cette dernière recherche utilisait un paradigme relativement simple. Il faut toutefois noter ici que les performances des enfants à la plupart des tâches d'inhibition simple plafonnent vers l'âge de 6 ans. À cet âge, les enfants atteignent déjà le niveau des enfants de 12 ans (Klenberg et al., 2001). C'est pourquoi, de manière générale, les tests d'inhibition utilisés à ces âges demandent d'inhiber les réponses dominantes dans des tâches où il y a présence de conflits ou encore nécessitent d'inhiber une réponse motrice dans une tâche de prise de décision. Ainsi donc, pour créer des tâches plus sensibles avec les plus vieux, il devient impératif pour les chercheurs d'évaluer l'inhibition avec

des épreuves progressivement plus complexes. Toutefois, comme dans l'article publié qui suit, seules des tâches simples ont été employées.

Résumé global du développement de l'inhibition selon la neuropsychologie clinique.

L'inhibition est centrale au développement et demeure relativement stable au fil de la croissance des enfants. Les manifestations de l'inhibition apparaissent très tôt dans la vie de l'enfant. Une des premières manifestations de l'inhibition se perçoit chez les bébés, parfois dès 8 mois, quand ils cessent un comportement à la demande d'un parent. Peu de temps après, vers 12 mois, les enfants commencent à pouvoir inhiber d'eux-mêmes des comportements moteurs simples qu'ils savent inefficaces dans l'atteinte de leurs buts. Pour les enfants de moins de 2 ans, il est possible de voir que l'incapacité d'inhiber des comportements surappris nuit de façon important aux apprentissages. C'est avec l'amélioration des capacités langagières, vers 3 ans, que les capacités d'inhibition font un bond en avant. Il faut toutefois remarquer que cette capacité d'inhiber se fait au profit d'un ralentissement des actions, comme si l'enfant devait investir autant d'énergie cognitive pour ne pas faire une action qu'il lui en faudrait pour la faire.

Les enfants parviennent à inhiber un comportement suite à une consigne verbale entre les âges de 3 et 5 ans. Toutefois, si on change une consigne en cours de tâche, ce n'est pas avant l'âge de 4 ans que les enfants parviennent à inhiber la première règle. Face à un problème complexe, la capacité d'un enfant à inhiber les réponses erronées est

plus utile à sa résolution que la capacité de maintenir en MdT les aspects perçus de la tâche.

Il semble donc que face à des épreuves d'inhibition motrice simple, les performances des enfants atteignent un niveau adulte dès 6 ans et, par la suite, c'est principalement les capacités de la MdT qui contribuent aux meilleures performances. L'inhibition d'une réponse motrice dominante serait donc la première habileté nécessaire dans le contrôle des comportements moteurs. Cette habileté serait aussi précurseur aux apprentissages et à la résolution de problèmes complexes qui sont le propre des comportements humains.

Oculométrie. En plus des questionnaires aux proches et des tests psychométriques, il est possible d'évaluer les fonctions cognitives et les FE en employant des paradigmes de saccades oculaires enregistrées par traqueur oculaire. Selon Karatekin (2008), c'est par la vue que nous percevons la majorité des informations sur le monde qui nous entoure. Ainsi, les mouvements oculaires révèlent beaucoup d'information sur la perception et l'apprentissage. En ce sens, le traquage oculaire (TO) est une technique facile et sécuritaire qui permet d'en apprendre beaucoup sur les processus cognitifs : l'attention visuospatiale, la perception, la mémoire, le langage et l'inhibition. Parmi les phénomènes que le TO permet d'étudier, nous comptons: la poursuite oculaire, la perception des visages, l'exploration de scène et les saccades oculaires.

Saccades. On appelle saccades oculaires les mouvements rapides des yeux qui ont pour but de placer sur la fovéa (zone de la rétine où la vision des détails est la plus précise) un objet déterminé. Ces mouvements reflètent donc un changement au niveau de l'attention visuospatiale. (Luna, Velanova, & Geier 2008).

Karatekin (2008) décrit deux types de saccades possibles: les saccades réflexives (automatiques et involontaires, orientées vers un stimulus qui apparaît soudainement) et les saccades dirigées (sous le contrôle de la volonté et dirigées vers un endroit où il y a absence de stimulus). Les AS entrent dans cette dernière catégorie. Une antisaccade est le mouvement oculaire volontaire dirigé dans la direction opposée à une cible apparue latéralement à un point de fixation, suite à la consigne, lors d'une tâche expérimentale. Depuis une quinzaine d'années, plusieurs chercheurs avancent que les tâches d'AS mesurées par traqueur oculaire permettent de mesurer l'inhibition sans faire appel à d'autres fonctions cognitives, contrairement aux tests neuropsychologiques classiques (Karatekin, 2008). Lors du déroulement d'une tâche d'AS, le participant est habituellement informé qu'il doit regarder dans la direction opposée au stimulus qui apparaîtra à gauche ou à droite d'un point de fixation. La procédure débute ensuite lorsque le participant fixe un point central sur un écran (le point de fixation). Par la suite, le point de fixation disparaît et une cible apparaît en périphérie. À ce moment, le participant doit effectuer une saccade du côté opposé à la cible. Le pourcentage de saccades effectuées dans la bonne direction (opposée au stimulus) est un indice de la capacité d'inhiber le réflexe de saccade oculaire.

Variables mesurées. Dans l'étude des saccades, le format de présentation classique consiste en la présence d'un point de fixation central qui disparaît, alors qu'au même moment, une cible latérale apparaît. En ce sens, quatre variables sont généralement mesurées. La première est la latence, soit le temps que l'œil met à quitter le point de fixation pour débiter une saccade vers la cible. La deuxième variable calculée est le temps de réaction qui est en fait, soit le temps qui s'écoule entre le moment où le point de fixation observé par le participant disparaît et le moment où la saccade du participant se termine sur la cible latérale (dans un paradigme de saccades) ou encore le moment où la saccade du participant se termine sur le côté de l'écran opposé à la cible (dans un paradigme d'AS). Finalement, les dernières variables calculées sont la vitesse moyenne des saccades et la distance du déplacement (Luna et al., 2008).

Antisaccades. En ce qui concerne les AS, en plus des temps de réaction et de la latence, une autre variable d'intérêt est la proportion d'erreurs (regarder tout de même le stimulus alors qu'on doit regarder dans la direction opposée). En effet, ne pas regarder un stimulus pour regarder en direction contraire nécessite d'inhiber le réflexe de mettre sur la fovéa un stimulus apparaissant subitement en périphérie. Cette capacité nécessite l'action du lobe frontal. Comme le lobe frontal a un développement progressif, les enfants plus jeunes commettent plus d'erreurs que les plus âgés (Everling, & Fischer, 1998; Karatekin, 2008).

De façon générale, les jeunes adultes sont plus rapides et plus précis que les enfants et les personnes âgées pour effectuer des saccades et des AS. De même, les populations ayant un DT sont plus rapides et précises dans l'exécution de ces tâches que les populations présentant des psychopathologies ou présentant une lésion acquise (Karatekin, 2008).

Fixation. Comme il en a été maintes fois question dans la section portant sur le développement des FE, évaluer l'inhibition avec des tâches qui font le moins possible appel à la MdT est important et permet d'obtenir des résultats où il y a un minimum d'interprétations possibles. Il apparaît que la tâche d'AS comporte une consigne relativement simple. Toutefois, certains auteurs effectuant des recherches auprès d'échantillons d'enfants âgés de plus de 9 ans présentant des problématiques développementales ont mis au point une tâche oculomotrice où la consigne se voulait encore plus simple que la consigne de la tâche d'AS. Ces chercheurs ont donc élaboré une tâche qui demande d'inhiber une saccade vers le stimulus présenté en périphérie, mais sans avoir à émettre une saccade dans la direction opposée (Clementz, McDowell, & Zisook, 1994; Loe et al., 2012). Cette tâche consiste tout simplement à demander au participant de regarder le point de fixation et, lorsque celui-ci disparaît et qu'un distracteur apparaît en périphérie, le participant doit inhiber la saccade vers le nouveau stimulus et continuer de regarder à l'endroit où était préalablement situé le point de fixation. Ainsi, cette tâche demande seulement d'inhiber la saccade réflexive. Les résultats auprès d'un groupe d'enfants prématurés suggèrent que la tâche de fixation

était plus sensible aux difficultés d'inhibition du groupe clinique que le paradigme d'AS. Il apparaît donc que cette tâche est relativement plus simple que la tâche d'AS classiquement employée par les chercheurs lorsque l'inhibition doit être quantifiée. Cette tâche est principalement utile pour les participants chez qui un effet plancher (une performance si faible qu'elle n'informe aucunement sur les capacités des participants) apparaît lors des tâches d'AS, ce qui rend les résultats non interprétables. Dans ce cas, les tâches de « fixation » peuvent être une alternative utile pour évaluer les capacités d'inhibition oculomotrice.

Développement des saccades et antisaccades. Nous avons déjà vu le développement des processus électrophysiologiques qui sous-tendent l'inhibition, ainsi que le développement de l'inhibition motrice dans le cadre des recherches neuropsychologiques qui cherchaient à en tracer les grandes lignes au fil de la croissance de l'enfant. Nous allons maintenant voir le développement de l'inhibition oculomotrice.

Ce sont principalement les paradigmes d'AS qui sont utilisés en recherche sur l'inhibition par l'intermédiaire des équipements de traquage oculaire. Nous utiliserons donc ici les résultats de recherches sur les AS, avec des participants de tous âges, de manière à tracer le développement des AS au fil du développement des enfants. Mentionnons tout d'abord que les caractéristiques de base des saccades (regards dirigés vers une cible le plus rapidement possible après son apparition) sont matures chez les enfants âgés de 4 à 6 ans (Luna et al., 2008). C'est donc dès cet âge que les saccades

réflexives des enfants se font à la même vitesse que celles des adultes, ce qui indique que les structures sous-corticales responsables de ce réflexe sont déjà matures à ce moment.

Nous tenterons maintenant de voir comment se développe spécifiquement l'inhibition oculomotrice au fil de la croissance d'enfants présentant un DT. L'évaluation de l'inhibition oculomotrice à l'aide de tâches d'AS auprès des tout petits comporte des défis. Grâce à un appareillage ajusté et à un paradigme ingénieux, Johnson (1995) a tenté de faire faire une épreuve d'AS à des poupons de 4 mois.

Études chez les bébés. Comme il leur était impossible de donner une consigne comme « regardez dans la direction opposée au stimulus » à des enfants de 4 mois, l'auteur (Johnson, 1995) faisait apparaître un stimulus au point de fixation pour capter l'attention des enfants. Par la suite, un stimulus moins attrayant apparaissait, juste avant un autre stimulus beaucoup plus attrayant. Ainsi, les enfants pouvaient anticiper l'apparition du stimulus plus attrayant et donc en venir à ne plus regarder le stimulus moins attrayant. Il y avait donc dans un premier temps une phase d'apprentissage où les enfants regarderaient la cible non attrayante. Trente-neuf enfants ont participé et les résultats de 19 ont été exclus pour ne pas avoir été capables de porter attention au point de fixation en début d'expérience ou pour ne pas avoir complété suffisamment d'essais correctement. Ainsi, les résultats de vingt enfants de 4 mois ont été analysés. Lorsque l'auteur compare les résultats des enfants dans la première et la deuxième moitié de

l'expérience, la différence entre le nombre d'orientations directement à la cible est statistiquement significative, ce qui indique qu'en deuxième moitié d'expérience les enfants inhibent le regard à la cible pour aller regarder le dernier stimulus plus attrayant. Certains enfants sont capables d'inhiber des comportements oculaires dès 4 mois. Bien que ces jeunes enfants émettaient moins de saccades vers la cible, ils n'émettaient tout de même pas de saccades anticipant l'apparition de la cible du côté controlatéral quand la cible n'apparaissait pas systématiquement du côté opposé. Ces poupons sont donc parvenus à inhiber, après un bref apprentissage, le réflexe de regarder la cible nouvellement apparue en périphérie. Toutefois, ils ne sont pas parvenus à effectuer la saccade dans la direction opposée.

Holmboe, Fearon, Csibra, Tucker et Johnson (2008) ont mené une étude auprès de 24 enfants qui ont été évalués à 9 mois, à 20 mois, puis à 24 mois. Les auteurs comparent, entre autres, les performances des enfants à une tâche A-non-B évaluée à 9 mois aux performances obtenues à une tâche de TO complétée à 20 et 24 mois. Leurs résultats suggèrent que les enfants qui inhibaient le regard au distracteur dans la tâche de TO étaient ceux qui avaient le mieux réussi la tâche *A-non-B* à 9 mois. Dans les comparaisons entre les performances à 9 et à 24 mois, il semble donc que les enfants qui apprenaient le plus rapidement à inhiber à 9 mois étaient moins sensibles aux interférences à 24 mois. Cette étude suggère donc un lien entre la capacité d'inhiber un comportement appris dans une tâche de recherche spatiale à 9 mois et la capacité d'inhiber un regard vers un distracteur à 24 mois.

Nakagawa et Sukigara (2007) ont conduit une étude auprès de vingt-neuf enfants de 3 à 11 mois. Ces chercheurs ont utilisé une tâche d'AS similaire à celle employée dans la tâche de Johnson (1995). Leur objectif était d'étudier les caractéristiques des mouvements de tête et des mouvements oculaires des jeunes enfants pendant une tâche d'AS. Les résultats suggèrent que les plus jeunes participants bougeaient leur tête et leurs yeux pour suivre les stimuli, tandis que les plus vieux ne bougeaient que leurs yeux, mais que leur tête demeurait immobile. (Nakagawa, & Sukigara, 2007).

Des auteurs (Scerif et al., 2005) ont évalué 18 enfants de 8 à 38 mois (moyenne = 23,5 mois) qui présentaient un DT. De manière générale, les enfants qui ont un DT (comme dans Johnson, 1995) parvenaient à émettre des AS en deuxième moitié d'expérience, après avoir profité de l'apprentissage dans la première partie de l'expérience. Également, plus les enfants étaient âgés, plus le nombre d'AS effectuées était grand. Comme dans l'expérimentation de Johnson (1995), les enfants de 4 mois ont inhibé davantage leurs regards vers la cible en deuxième partie, mais n'ont pas émis d'AS. Les participants les plus jeunes qui ont émis des AS étaient les enfants de 18 mois.

Hormis les quelques études mentionnées plus haut, la majorité des études évaluant l'inhibition par l'intermédiaire des tâches d'AS ont été menées avec des sujets de 5 ans et plus (Everling, & Fischer, 1998; Munoz, Broughton, Goldring, & Armstrong, 1998).

Les capacités des jeunes enfants d'inhiber une saccade vers un stimulus pour plutôt regarder en sa direction opposée (AS) sont de l'ordre de 60 % de réussite chez les enfants âgés entre 5 et 8 ans (Luna et al., 2008). De plus, les temps de réaction aux AS diminuent graduellement jusqu'à l'adolescence.

L'accélération des temps de réaction des AS est partiellement attribuée à l'accélération de transmission des influx électriques dus à la myélinisation. L'augmentation des capacités de contrôle de l'attention visuelle contribue (Nigg, 2000) aussi à l'amélioration des temps de réaction aux AS. Nous verrons maintenant, en plus de détails, le développement des variables d'intérêts dans l'étude des AS, soit la vitesse, la latence et la justesse des réponses.

Vitesse. En ce qui a trait à la rapidité des AS, une étude de participants de 5 à 79 ans (Munoz et al., 1998) montre que, même si les temps de réaction des saccades plafonnent à 8 ans, les temps de réaction aux AS s'accélèrent continuellement entre l'enfance et l'âge de 18 ans. Suite à leur accélération, les temps de réaction les plus rapides aux AS sont obtenus entre 18 et 22 ans (Salman et al., 2006). Selon ces auteurs, l'accélération des temps de réaction aux AS progresse grâce à la maturation cérébrale. Ainsi, le tronc cérébral et les régions du cervelet qui contribuent à la vitesse des saccades sont matures à 8 ans. En ce qui a trait aux AS, les lobes frontaux, qui contribuent au désengagement de l'attention et au déplacement de l'attention, poursuivent leur maturation pendant

l'adolescence, ce qui explique la progression tardive des AS. Après l'âge de 22 ans, les performances aux AS ralentissent progressivement.

Plusieurs études chez des populations d'enfants et d'adultes au DT en arrivent relativement aux mêmes conclusions. Ainsi, les AS accélèrent avec la croissance, entre les âges de 5 à 18 ans, plafonnent entre les âges de 18 à 22 ans pour ensuite diminuer progressivement à l'âge adulte. (Fukushima, Hatta, & Fukushima, 2000; Klein, 2001; Luna, Garver, Urban, Lazar, & Sweeney, 2004; Munoz et al., 1998).

Les chercheurs qui étudient le développement des saccades et des AS comparent habituellement les performances aux tâches de saccades et d'AS. Ainsi, la rapidité des saccades sert de niveau de base auquel sont comparées la latence et la vitesse des AS d'un participant. Cette amélioration des performances indiquerait une augmentation des capacités de contrôle cognitif due au développement progressif des lobes frontaux.

Latence. Une autre variable étudiée dans les tâches d'AS est la latence (temps écoulé entre la disparition du point de fixation central et le début du mouvement oculaire vers la cible pour les saccades et dans la direction opposée pour les AS sans erreurs). Ainsi, entre l'enfance et l'adolescence, le temps de latence diminue progressivement et devient stable et au même niveau que les adultes dès l'âge de 12 ans. Ceci indiquerait une accélération de la vitesse de traitement (traitement de l'information, transformation

de l'information visuelle en messages moteurs et la génération de saccades) qui atteint la maturité en début d'adolescence (Fukushima et al., 2000).

Précision. Quant au nombre d'AS correctement effectuées, il faut remarquer qu'entre les âges de 5 et 8 ans, une grande variabilité entre les performances des sujets est observée. Les plus jeunes ont peu de contrôle et font donc des saccades trop rapides et imprécises ou tout simplement trop lentes. Ils peuvent commettre jusqu'à 50 % d'erreurs dans les tâches d'AS. Cette performance diminuera jusqu'à environ 10 % vers l'âge de 15 ans et se stabilisera après l'âge de 20 ans. En effet, Klein (2001) évalue, grâce à des régressions faites à partir des performances et des caractéristiques personnelles des participants, que l'âge explique jusqu'à 51 % de la variance des erreurs commises dans une tâche d'AS entre les âges de 6 à 28 ans. Ce délai entre les performances médiocres des jeunes et celles, meilleures, des jeunes adultes, s'expliquerait par la lente maturation des connexions cortico-corticales situées dans le lobe frontal, maturation qui se produit pendant l'adolescence. Fukushima et ses collègues (2000) ajoutent que cette dernière amélioration est expliquée par l'amélioration de la transmission de l'information entre le lobe frontal, l'aire oculomotrice supplémentaire et le cortex préfrontal dorso-latéral.

Des chercheurs qui ont étudié le développement de l'inhibition de participants âgés de 8 à 30 ans, expliquent que, selon eux, la tâche d'AS demande beaucoup de contrôle descendant sur le plan attentionnel (Kramer, Gonzalez de Sather, & Cassavaugh, 2005).

Une erreur commise lors d'une tâche d'AS est donc un indice de l'incapacité de faire fi du réflexe de regarder vers une cible qui apparaît en périphérie. La plupart du temps, les participants âgés de plus de 8 ans effectuent une correction suite à ces erreurs en émettant une saccade corrective vers le côté approprié, soit le côté opposé de la cible. Ceci est alors un indice que le participant a bien compris la consigne, mais qu'il n'a tout simplement pas été capable d'inhiber la saccade réflexive (Luna et al., 2008).

Les performances des enfants quant aux nombres d'erreurs commises s'améliorent nettement entre les âges de 8 et 12 ans (Fukushima et al., 2000). Klein (2001) a conduit une recherche similaire chez une population de participants âgés de 6 à 26 ans. Ses résultats confirment l'amélioration importante jusqu'à l'âge de 12 ans et ajoute qu'une légère progression se poursuit jusqu'à l'âge adulte.

La majorité des études nommées plus haut mentionnent que, dès le plus jeune âge, les participants évalués arrivent à effectuer au moins une antisaccade. Toutefois, beaucoup de fluctuations de performances sont remarquées chez les plus jeunes. Ainsi, Munoz et al. (1998) suggèrent que ce ne serait pas tant la capacité de faire une antisaccade qu'il est pertinent d'étudier, mais bien la capacité de le faire de la manière la plus constante possible. Comme nous l'avons vu, dans des conditions optimales, même des poupons de 9 mois y parviennent (Johnson, 1995). Puis, au fil du développement, les

systèmes oculomoteurs et de contrôle cognitif mûrent à des vitesses relativement similaires chez les enfants au DT.

Corrélations entre psychométrie et traquage oculaire. Karmiloff-Smith (2006) soulève l'importance d'utiliser le plus de types de mesures possible dans l'étude du développement des enfants. Pourtant, les chercheurs emploient souvent soit les tests neuropsychologiques, soit les tâches de TO pour étudier les FE et leur développement chez les enfants. Peu de recherches ont cherché à déterminer la convergence d'indices entre les tests neuropsychologiques et les tâches de TO. Il apparaît important qu'une telle démarche soit entreprise. Nieuwenhuis, Broerse, Nielen et de Jong (2004), mentionnent l'importance de mesurer méticuleusement la validité convergente des tâches qui sont censées mesurer le même construit avant d'affirmer, sans preuves empiriques, qu'elles sont équivalentes.

À notre connaissance, seulement trois études ont traité d'inhibition en utilisant des tests neuropsychologiques et un paradigme d'AS (Christ, White, Brunstrom, & Abrams, 2003; Friedman, Miyake, Robinson, & Hewitt, 2011; Kraus et al., 2007). Kraus et ses collègues (2007) ont employé une batterie de tests neuropsychologique, dont le *Stroop* pour évaluer l'inhibition, dans le but de comparer les performances de sujets adultes ayant subi des TCC légers, modérés ou sévères. Dans leurs analyses, les performances aux tâches de TO n'ont été comparées qu'à trois scores globaux issus des nombreux tests neuropsychologiques (attention, mémoire et FE). Cette dernière recherche a avancé

que les participants TCC ont des temps de réaction plus lents et des proportions d'erreurs plus élevées. Ils ajoutent que ces dernières performances sont corrélées négativement à leurs scores dans les domaines de l'attention, de la mémoire et des FE. Selon eux, les données oculaires différencient mieux les TCC légers des participants contrôle, mais les données neuropsychologiques du domaine des FE différencient mieux les TCC légers des TCC modérés et sévères.

Friedman et al. (2011) ont étudié le développement des FE de jeunes ayant un DT âgés de 14 mois à 17 ans en utilisant une panoplie de tests dont, notamment, des paradigmes de saccades/AS (tâche d'évaluation de l'inhibition oculomotrice) et le *Stroop* (tâche d'inhibition cognitive). Ils concluent qu'il y a une corrélation positive entre la capacité d'inhiber un comportement à un très jeune âge (14 mois) et les FE à 17 ans. Toutefois, ils considèrent les FE comme un concept unitaire et le quantifient avec un score unique.

Christ et al. (2003) ont évalué un échantillon d'enfants atteint de paralysie cérébrale (PC) et un groupe contrôle à l'aide de trois tâches d'inhibition : le *Stroop*, une tâche similaire à un *go/no-go* et une tâche d'AS. Des difficultés significatives sont remarquées à chaque tâche pour les enfants PC. Toutefois des corrélations entre les tâches n'ont pas été calculées, ce qui ne permet pas de comparer entre elles les différentes performances aux tests.

Ainsi donc, malgré leurs résultats significatifs, ces trois études présentent des scores globaux de domaines et ne comparent ni n'évaluent la convergence des résultats des tests neuropsychologiques spécifiques destinés à mesurer l'inhibition cognitive et les résultats de tâches d'AS. Il semblerait donc pertinent, à ce moment-ci, d'évaluer si des corrélations sont présentes entre les résultats des tests neuropsychologiques sondant l'inhibition motrice et des tâches d'AS qui évaluent l'inhibition oculomotrice.

Objectifs

Ainsi, seul un très petit nombre de recherches ont évalué la convergence des résultats entre des épreuves neuropsychologiques d'inhibition et des tâches d'AS présentées au moyen d'un traqueur oculaire. Il importe donc de conduire de telles études avant d'affirmer que ces deux genres d'épreuve sondent la même fonction (Nieuwenhuis et al., 2004).

Le premier objectif de la présente recherche est donc d'étudier comment se développe l'inhibition des mouvements volontaires et l'inhibition oculomotrice chez des enfants âgés de 5 à 8 ans. Ceci enrichira notre compréhension de l'évolution de l'inhibition entre ces deux âges. Par le fait même, les informations recueillies à propos de cette évolution pourront éclairer la compréhension des variations de performances chez les enfants de cette étendue d'âge. Ces informations pourraient expliquer pourquoi un modèle à un seul facteur explique les résultats des performances des enfants aux

tâches de FE avant l'âge de 5 ans (Wiebe et al., 2008) tandis que, par la suite, ils sont mieux expliquées par un modèle à trois facteurs (Lehto et al., 2003).

Le deuxième objectif est d'évaluer comment se développent les performances aux tâches d'inhibition aux deux types de mesures.

Le dernier objectif de cette étude est d'évaluer si la tâche de fixation parvient à mieux évaluer les capacités d'inhibition chez les participants (plus particulièrement les plus jeunes d'entre eux) que l'épreuve classique d'AS utilisée conventionnellement.

RapportGratuit.com

Chapitre I

Inhibition Development: Comparison of Neuropsychological
and Eye Tracking Measures

Inhibition Development:

Comparison of Neuropsychological and Eye Tracking Measures¹

Marc Mainville ¹

Julie Brisson ²

François Nougrou ³

Annie Stipanivic ¹

Sylvain Sirois ¹

¹ Department of Psychology, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada.

² Laboratoire Psy-NCA (EA 4700), Université de Rouen, France.

³ Department of Electrical Engineering, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada.

Corresponding author : Marc Mainville, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada. Secrétariat du département de psychologie, UQTR, 3351, boul. des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières (Québec) G9A 5H7; (819) 376-5011, ext. 4258; Marc.Mainville@uqtr.ca

¹ Les normes de présentation de la revue dans laquelle sera publié cet article se trouve en Appendice B.

Abstract: Inhibition is the ability to stop an automatic response when a stimulus is presented. It is one main component of executive function models. Few studies have evaluated the development of this ability between five and eight years of age, particularly using eye tracking measures. The first aim of this exploratory study is to evaluate the performance difference of younger compared to older children. The second aim is to evaluate if inhibition assessed via three different neuropsychological tests develops at a similar rate as inhibition assessed via two eye tracking tasks. Forty-six children aged 5 years 8 months to 8 years and 5 months completed both types of tests. Results show one neuropsychological test was sensitive to the children' increasing inhibition ability, while both eye tracking tests were. Additionally, scores from one eye tracking task correlated with scores from one neuropsychological test. Possible explanations of moderate relations between tasks are discussed.

Keywords: Inhibition; eye tracking; neuropsychological testing; children

Inhibición del desarrollo:

comparación de las medidas neuropsicologicas y de Eye Traking

Resumen: La inhibición es la capacidad de detener una respuesta automática. Es una de las funciones ejecutivas principales. Pocos estudios han evaluado su desarrollo en niños de cinco a ocho años utilizando pruebas de seguimiento de ojos. Este estudio exploratorio tiene, como primer objetivo, evaluar la diferencia de rendimiento entre los más jóvenes y los mayores. El segundo objetivo es evaluar si la inhibición se desarrolla a un ritmo similar en tres pruebas neuropsicológicas y dos pruebas de seguimiento de ojos. Cuarenta y seis niños, de 5 años, 8 meses a 8 años, 5 meses, realizaron ambos tipos de pruebas. Los resultados muestran que una de las pruebas neuropsicológicas y ambas pruebas de seguimiento de ojos fueron sensibles a la mejora de la inhibición. Además, resultados de una prueba de seguimiento de ojos y de una prueba neuropsicológica estaban correlacionados. Se discuten las explicaciones posibles de las relaciones entre las tareas.

Palabras claves: Inhibición; seguimiento de ojos; pruebas neuropsicológicas; niños

1. Introduction

Inhibition is the ability to refrain prepotent responses. Executive functions (EFs) models differ, but inhibition remains as major component for most authors (Carlson, 2005; Diamond & Lee, 2011; Zelazo, Carter, Reznick, & Frye, 1997). According to Miyake and Friedman (2012), inhibition has a key role, being the common EF while shifting and updating were specialised and independent functions.

Zelazo and Müller (2011) suggested that three-year-old children can already inhibit responses to salient aspects of stimuli. This demonstrated inhibition appears early and may have an important role in EFs development.

Many studies have investigated the development of EFs in children. One of these (Wiebe, Espy, & Charak, 2008) evaluated children of 2 to 6 years of age. Inhibition and updating were tested with a variety of neuropsychological tests. Through factor analysis authors concluded that one factor including both functions sufficed to explain the children's performances. This implied that before age 6, there is no distinction between EFs as identified in adult samples, and that child EFs appear to be a unitary component. Lehto, Juujärvi, Kooistra and Pulkkinen (2003) tested children 8 to 13 years with neuropsychological tests assessing inhibition, shifting and updating. Following their factor analysis, a three factor model, the same factors Miyake and Friedman (2012) identified with adults, explained their results with children. That study suggested that, in older children, EFs had developed in a way that made them separable and independent, similar to adults. These two studies with children suggest there is a shift in in EFs between ages five and eight, because results were explained by a one component model before age six and by a three component model after age eight.

Clinical assessment of EFs typically uses standardised psychometric tests to measure and quantify participants' cognitive abilities. Tests commonly used by neuropsychological clinicians are usually validated with important samples and demonstrate good fidelity. Nevertheless, neuropsychological evaluation faces many challenges. For some authors (Kaplan, 1988; Stuss, & Alexander, 2000), there often is a possibility that a test destined to evaluate performances of one particular cognitive function, also taps in other abilities (color perception, reading ability, reaction time and motor speed, etc.), and so a thorough evaluation and study of convergence of results is necessary before conclusions about the development of EFs, and particularly inhibition, are drawn.

Other than neuropsychological tests, it is possible to assess cognitive functions and EFs with eye tracking saccade paradigms (Karatekin, 2008). Saccades are rapid eye movements that are used to locate a specific visual target in the fovea. These eye movements are therefore a good way to assess a change in visuospatial attention. Eye tracking researchers have been using the antisaccades paradigm to evaluate inhibition in normal and clinical sample for over fifteen years (Karatekin, 2008). Antisaccades are voluntary eye movements directed towards the opposite direction of the target stimulus appearing laterally in an experimental task (Karatekin, 2008). Eye tracking technology thus provides a way to evaluate inhibition abilities without relying on other cognitive functions, unlike classical neuropsychological tests.

So far, most studies used antisaccade tasks with samples older than eight years old (Everling & Fischer, 1998). Success rate at antisaccade tasks before that age is low (Luna, Velanova, & Geier, 2008). A handful of studies with clinical participants over 9 years (Clementz, McDowell, & Zisook, 1994; Loe et al., 2012) have used a *fixation task* with simpler instructions: "Keep looking

at the center of the screen when the central fixation point disappears and the distractor appears laterally”. This task’s simpler instruction puts less demand on working memory.

To the best of our knowledge, only two studies have used both antisaccade tasks and neuropsychological tests in children research: Christ, White, Brunstrom, and Abrams (2003), and Friedman, Miyake, Robinson and Hewitt (2011). Despite the use of neuropsychological tests and eye tracking tasks, neither of these studies compared or evaluated the convergence of eye tracking tasks and neuropsychological tests.

A limited number of studies have focused on converging evidence of eye tracking measures and neuropsychological tests. Doing so is essential before drawing conclusions that one type of testing evaluates the same ability as the other one (Nieuwenhuis, Broerse, Nielen, & de Jong, 2004). Therefore, the first aim of the present study is to investigate how inhibition develops between five and eight years of age. This may shed light on how EFs can be explained by a single component model before six, and by a three components model after eight. The second aim is to evaluate how inhibition performance develops on both types of measures. A third aim is to evaluate if a *fixation task* is better to assess inhibition via eye tracking with participants aged five to eight than a conventional antisaccade tasks.

2. Method

In this next section, participants and methodology used in the present study will be presented and described.

2.1. Participants

A sample of 53 French speaking children from two schools in Trois-Rivières (Canada) participated in this study. Participants’ age ranged from 5 years 8 months to 8 years and 5 months

(Table 1). Mothers' number of years of education was used as socio economic status variable. Non-inclusion criteria included previous head trauma and visual impairments uncorrected by glasses. Children were recruited by letters to parents distributed through the schools. All experimental procedures were reviewed and approved by the Université du Québec à Trois-Rivières' human research ethics committee. Parents provided informed consent, and children provided assent. Participants were compensated for participation with personalised diploma and stickers. Seven participants were excluded from analyses: one for unforeseen visual problems, two for being unable to remain calm during eye tracking evaluation, and three for procedure errors. One participant started the evaluation but refused to complete. Forty-six participants were included in final analysis.

Table 1

Age and gender distribution of participants completing tasks

Group	1	2	3
Mean age (sd)	6y (2m)	6y 9m (3m)	7y 11m (5m)
Range	5y 8m-6y 4m	6y 4m-7y 1m	7y 2m-8y 5m
Male	8	8	10
Female	8	8	4
MNYE*	16.1(1.7)	14.1(2.7)	15.3(2.0)

*Mean (sd) mothers' number of years of education

2.2. Procedure and instruments

Participants were evaluated individually in their school, during free time periods. Eye tracking tasks and neuropsychological tests were conducted by trained graduate and undergraduate students. Eye tracking tasks were presented in fixed order while neuropsychological tests were presented in random order.

2.2.1. Neuropsychological testing. Inhibition was evaluated with three measures commonly used by clinical neuropsychologist.

Walk Don't Walk (WDW), a subtest from *Test of Everyday Attention for Children - TEA-Ch* (Manly, Robertson, Anderson & Nimmo-Smith, 2006). When participants hear a regular tone, they need to draw a line (one "step") along a path of successive squares printed on a sheet of paper. When a different tone is heard, no further step must be drawn. One point is recorded when participants' mark stops in the appropriate square. If a mark is drawn in the next square, a failure is recorded. Number of correct answers out of 20 trials constitutes the participant's score. The French version of the *TEA-Ch* Battery was validated with a sample of 379 children aged 6 to 13 recruited and tested in France. Raw scores were used for analyses.

Tower of London (ToL). The *ToL* (Culbertson, & Zillmer, 2006) involves a set of 3 colored balls, placed on 3 pegs of different heights. An initial state of the balls has to be converted to a goal state illustrated on a model set. This has to be completed in a minimum number of movements. Scores are obtained for number of moves and time taken to complete. Rule breaks are recorded when more than one ball is moved at a once, or when too many balls are placed on a stick. *ToL* is used by clinicians to assess planning abilities, but rule breaks are known to imply inhibition difficulties (McCormack, & Atance, 2011). This latter measure will be used as an inhibition index. Best score would be zero (for no rule broken). This test was validated with an American and an English speaking Canadian sample aged from 7 to 80 years old, with 110 children in the 7 to 9 group. Log transform of raw scores of "rule breaks" will be used for statistical analysis, because this test is known to have an important ceiling effect.

"Knock-Tap" (KT). This subtest from the *NEPSY* battery (Korkman, Kirk, & Kemp, 2003) is designed to evaluate motor inhibition abilities. For the first 15 trials of test, when the evaluator knocks with a closed fist on a surface, the child has to hit the surface with an open hand and vice

versa. Participant has to inhibit imitation and follow the learned rule. For the last 15 trials the rules change: when the evaluator knocks with a closed fist on a surface, the child has to hit the surface with the side of his hand; when the evaluator hits the surface with the side of his hand, the child has to knock with a closed fist on a surface; and when the evaluator hits the surface with an open hand, the child has to stay still. Participants have to inhibit imitation and the previously learned set of rules for these latter trials. Maximum score is 30. The French version of the *NEPSY* Battery was validated with a sample of 325 children aged 3 to 12 recruited and tested in France. Log transform of raw scores will be used for statistical analysis, because this test is also known to have an important ceiling effect.

2.2.2. Eye Tracking Test Procedures. Participants were tested in a quiet room, positioned 60 cm from an eye tracker screen in a custom made chin and forehead rest to reduce head movement. Gaze and pupil data were collected at a 60Hz sampling rate, using a Tobii T120 eye tracker (Tobii Technology, Stockholm, Sweden) equipped with an integrated 34 × 28 cm screen (1,280 × 1,024 pixel resolution; 60-Hz refresh rate). Stimuli were displayed using E-Prime software (Psychology Software Tools, Inc, Pittsburgh, Pennsylvania). After a 5-point calibration procedure, the first eye tracking task was verbally explained while screenshot pictures of the task were shown. Participants were asked to repeat instructions to make sure they understood. After completion of the first task, the second task was explained and so on. Target stimuli for all tasks were circles 0.5 degree of visual angle in diameter randomly presented 5, 10 or 15 degree of visual angle at left or right of central fixation cross. For every task, 36 trials were presented with a break after a first block of 18 trials (Figure 1).

Fixation task. Participants fixated a central cross (0,5 degree high by 0,5 degree wide) appearing on the computer screen. When it disappeared, they held their gaze at central fixation area while distractor stimuli appeared for 2 seconds. Eye movements more than 2.5 degree right or left from

central location were considered as errors. Looks toward the distractor were considered inhibition errors. Looks toward distractor corrected within 1000 milliseconds were considered corrected inhibition errors (indicating task was understood but behaviour could not be inhibited). Looks in opposite direction from distractor were considered as directional errors (behaviour was inhibited but looks did not remain in central area as instructed). Percentages of successes and of each type of error were calculated.

Antisaccade task. Participants fixated a central cross (0,5 degree high by 0,5 degree wide) appearing on the computer screen. When it disappeared, they were asked to look in the opposite direction of a stimulus, which appeared for 2 seconds. Looks toward distractor were considered inhibition errors and looks toward distractor corrected within the first second were considered corrected inhibition errors. Percentages of success and of each type of error were calculated. Latency was measured for successful trials.

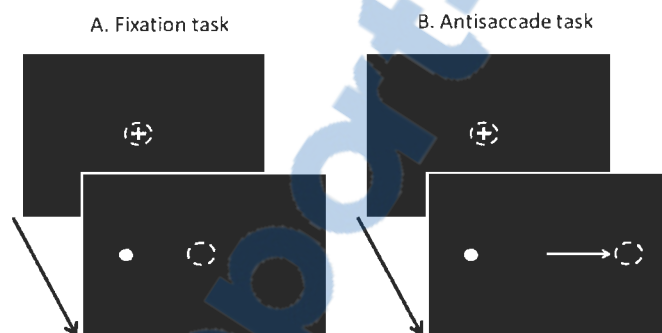


Figure 1. A. *Fixation task*: look maintained towards center of screen. B. *Antisaccade task*: Saccade towards opposite side of target.

2.2.3. Eye Movement Analysis. Eye movement recordings were analyzed offline using in-house programs written in MATLAB (MathWorks, Inc, Natick, Massachusetts). The program automatically identified and analysed fixations and saccades of eye tracking protocol in a given time-window. This used an algorithm based on the *Dispersion-Threshold Identification* method,

which determines saccades from the degree of dispersion of X and Y positions of recorded gaze data (Salvucci, 1999).

3. Results

Results will be presented according to three aims mentioned earlier. Therefore, all tasks will be analysed with relation to age. Neuropsychological tests and eye tracking tasks will be compared. Finally performances on fixation task will be compared to antisaccade task.

3.1. Preliminary analyses

All tests were 2-tailed; significance was set at $p < .05$. Initial analyses were conducted to determine whether there was any left-right or position asymmetry in any of the eye tracking measures. No differences were found for the *fixation* or *antisaccade task* data, therefore response side and position were not included as a variable in subsequent analyses. Means and standard deviations for neuropsychological and eye tracking measures are shown in Table 2.

Table 2
Mean and standard deviation of neuropsychological and eye tracking variables

Variable	Mean (SD)
<i>WDW</i>	10.53 (3.78)
<i>KTlog</i>	0.37 (0.29)
<i>TOLlog</i>	0.27 (0.26)
Correct fixation	35.51 (20.78)
Fixation directionnal error	4.42 (5.21)
Fixation uncorrected error	13.40 (11.28)
Self-corrected fixation	46.67 (18.64)
Correct Antisaccade	33.41 (16.65)
Antisaccade uncorrected error	16.36 (11.78)
Self-corrected antisaccade	50.22 (14.92)
Antisaccade latency (ms)	435 (105)

3.2. Correlation of inhibition measures and age

The first aim of this study was to investigate how inhibition develops between five and eight years of age. To assess potential changes, Pearson's correlations with age were calculated for each variable.

3.2.1. Neuropsychological tests. Table 3 displays correlations of performance on the three tests with age. Performances of older children were better at *WDW* than younger children. As mentioned earlier, *KT* and *ToL*, data were examined after log transformation, which was performed to correct for lack of normal distribution in both variables for all age groups. Neither tests showed statistically significant sensitivity to development, and therefore were not used for further analysis of convergence between neuropsychological tests and eye tracking tasks.

Table 3

Neuropsychological tests variable correlations with age

Variable (%)	Age	
	<i>r</i>	<i>p</i>
<i>WDW</i>	0.496	0.001
<i>KTlog</i>	0.089	0.555
<i>TOLlog</i>	-0.255	0.087

3.2.2. Eye tracking tasks. Table 4 displays correlations with age of performance on both tasks. This research being of an exploratory nature, significance level was primarily set at $p < .05$ and then Bonferroni correction for multiple comparisons was applied at $p < .0125$. With regards to the reaction time measure, older children have shorter latencies when initiating antisaccades successfully.

The eye tracking variables that correlated significantly with age were *percentage of correct fixations*, *percentage of uncorrected errors on fixation task*, *percentage of correct antisaccades*,

and *percentage of uncorrected errors on the antisaccade task*. This shows older children made more correct responses on both tasks, and when an error was made, older participants were more prone to correct it immediately.

Table 4

Saccade variable correlations with age and WDW score

Variable (%)	Age	WDW	WDW age partialled out
Correct fixation	0.381 **	0.138	-0.063
Fixation directionnal error	0.087	0.387 **	0.397 **
Fixation uncorrected error	-0.368 **	0.084	0.330 *
Self-corrected fixation	-0.225	-0.313 *	-0.238
Correct Antisaccade	0.374 **	0.244	0.071
Antisaccade uncorrected error	-0.469 **	-0.181	0.073
Self-corrected antisaccade	-0.038	-0.129	-0.124
Correct antisaccade latency	-0.306 *	-0.032	0.148

* $p < .05$; ** $p < .0125$

3.3. Convergence between neuropsychological and ET tests

The second aim was to evaluate how inhibition performances evolve with age on both types of measures. To investigate if accuracy data of inhibition measures from *fixation* and *antisaccade tasks* were related to inhibition measured by *WDW*, correlations were calculated and results are shown in Table 4.

The variables that correlated significantly with *WDW* score were *percentage of fixation directional error* and *percentage of self-corrected fixations*. Since *WDW* score was related to age as well, first-order partial correlations controlling for the effect of age were conducted to identify the sole influence of inhibition measured by the neuropsychological test. *Percentage of fixation directional error* correlation remained significant, indicating that age had a minimal impact on that relationship. This suggests that children who performed better on *WDW* were also those who made saccades to the opposite side of the screen relative to where the target appeared, even

though it was not part of this task's instructions. Once age was partialled out, *percentage of self-corrected fixations* was no longer significantly correlated to *WDW*, indicating that the correlation between measures was better explained by age related changes.

Correlation with age also showed *percentage of uncorrected errors at fixation task* to significantly decrease with age, indicating that when oldest participants in the study committed inhibition mistakes on the *antisaccade task*, they were significantly more prone to correct them instantly. A relationship appeared when age was partialled out of the equation: correlation between this type of error and *WDW* becomes significant, indicating that those who perform better on the neuropsychological test also commit fewer mistakes on the eye tracking task.

3.4. Eye tracking tasks difference

The third aim was to evaluate if the *fixation task* is better to assess inhibition relative to conventional *antisaccade tasks*. To assess if participants performed better on the *fixation task* than on the *antisaccade task*, a one-way analysis of covariance (ANCOVA) was conducted with Task (*fixation* vs. *antisaccade*) entered as a within-participant independent variable and Age as a continuous covariable. Neither the main effect of Task nor the interaction between Task and Age reached statistical significance (respectively, $F_{(1, 44)} = 0,263$, $p = .611$, and $F_{(1, 44)} = 0,392$, $p = .535$).

4. Discussion

To better understand development, it is important to use a wide array of evaluation tools (Karmiloff-Smith, 2010). The present study evaluated inhibition, using neuropsychological tests and eye tracking tasks. The first aim of this study was to investigate inhibition development in a sample of children aged five to eight years, an age group seldom studied for they usually perform

poorly on eye tracking tasks. Correlations with age demonstrated that children's performance on *WDW* improved with age, as it had been demonstrated previously (Manly et al., 2001), but other neuropsychological tasks failed to point out statistically significant inhibition development.

Kramer, Gonzalez de Sather and Cassavaugh (2005) evaluated a sample of 8- to 25-year-olds and concluded that mean antisaccade latencies accelerated between the ages of 8 and 16 due to the maturation of the brain's visual pathways. Latencies' relationship with age measured in the present study shows how this acceleration has already begun in younger children.

Participants' ability to inhibit reflexive saccades increased with age on both eye tracking tasks. This improvement of performance was in line with results from Luna et al. (2008), who reviewed literature on the subject and found that performances on antisaccade tasks increased until 18 years of age.

When the oldest participants in the present study committed inhibition mistakes on the *antisaccade task*, they were significantly more prone to correct them instantly, a behaviour usually interpreted as remembering instructions despite being unable to inhibit responses (Karatekin, 2008). This might indicate that youngest participants performed poorly because they forgot instructions more often than older ones.

The second aim of this research was to investigate if inhibition measured by two eye tracking tasks used in neuroscience research was related to inhibition measured by neuropsychological tests commonly used by clinicians. Results showed that participants who performed better on some neuropsychological measures also committed fewer mistakes on the eye tracking tasks. This finding could be explained by the fact that some participants were better at controlling the mistakes they made, and that this ability was idiosyncratic characteristics of cognitive control.

This may be consistent with Miyake and Friedman's (2012) recent findings with twins. They suggested that genes might contribute to the variability of inhibition more than they contribute to the variability of shifting and updating. Nevertheless, they stated that with proper training, all three functions can be trained.

Every participant in the present study completed the eye tracking tasks in the same sequence, so none of them had practiced antisaccades before the *fixation task*. Therefore, it was unexpected that participants with the highest level of inhibition used a better strategy, namely looking in the opposite direction of the target even when it was not part of the instructions. This appears to be a strategy they developed, most likely "accidentally", to better perform on this task.

The third aim of this study was to evaluate if children under eight years of age performed better on a *fixation task* than on an *antisaccade task*, since the former task was an inhibition task with simpler instructions than the latter. Overall, both tasks assessed inhibition in a similar way, with participants performing at the same level as previous studies had found (Everling & Fischer, 1998). Participants did not perform better on a task designed to be simpler, showing that inhibiting prepotent responses was probably the greatest difficulty of these tasks, not remembering the instructions.

It is customary for developmental research to use samples with an age range of 10 years or more (Friedman et al., 2011; Kramer et al., 2005). Therefore, one of the possible explanations of our moderate results might be the smallness of our sample, and the youth and narrow age range of our participants. A greater sample would have enabled a Principal Component Analysis to be performed, which would have allowed to measure if eye tracking and neuropsychological test

variables loaded on same factors or not. This is a potentially promising avenue for future research.

Overall, only a limited number of eye tracking variables were moderately related with the neuropsychological measures. As Kaplan (1988) noted, neuropsychological tests often tap more than a single cognitive ability, therefore care must be taken before conclusions are drawn from performance on one single test. This might very well be the case of the present study. Two of the neuropsychological tests used displayed important ceiling effect and lacked sensitivity to participants' development. A third test used (*WDW*) was designed to assess inhibition, but it also required working memory and sustained attention (Manly et al., 2001), and this might have affected performance.

Other studies have had findings that displayed lack of correlation between tasks designed to assess inhibition as well. Huizinga, Dolan, and van der Molen (2006), using three neuropsychological tests, one involving reading (*Stroop*), one demanding motor responses (*Stop-signal*), and one presented on computer screen (*Flanker task*), also obtained results showing tasks performances were unrelated. The scarceness of links between neuropsychological and eye tracking measures leads us to agree with Nigg (2000), who suggested that motor and oculomotor inhibition were not the same ability. Friedman and Miyake (2004) also suggested that researchers used the term "inhibition" too loosely, and that they needed to be more specific when using the term and when evaluating the ability.

Author notes

This work was supported by a Canada Research Chair award to the last author.

References

- Carlson, S. M. (2005). Developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 595-616.
doi: 10.1207/s15326942dn2802_3
- Christ, S. E., White, D., Brunstrom, J. E., & Abrams, R. A. (2003). Inhibitory control following perinatal brain injury. *Neuropsychology*, 17(1), 171-178. doi: 10.1037/0894-4105.17.1.171
- Clementz, B. A., McDowell, J. E., & Zisook, S. (1994). Saccadic system functioning among schizophrenia patients and their first-degree biological relatives. *Journal of Abnormal Psychology*, 103(2), 277-287. doi:10.1037/0021-843X.103.2.277
- Culbertson, W., & Zillmer, E. (2006). *Tower of London - Drexel University*. Toronto, Canada: Multi-Health Systems.
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, 333(6045), 959-964.
- Everling, S., & Fischer, B. (1998). The antisaccade: A review of basic research and clinical studies. *Neuropsychologia*, 36(9), 885-899. doi: 10.1016/S0028-3932(98)00020-7
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 101-135. doi: 10.1037/0096-3445.133.1.101
- Friedman, N. P., Miyake, A., Robinson, J. L., & Hewitt, J. K. (2011). Developmental trajectories in toddlers' self-restraint predict individual differences in executive functions 14 years later: A behavioral genetic analysis. *Developmental Psychology*, 47(5), 1410-1430.

- Huizinga, M., Dolan, C. V., & van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017-2036. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010
- Kaplan, E. (1988). A process approach to neuropsychological assessment. In T. Boll & B. K. Bryant (Eds), *Clinical neuropsychology and brain function: Research, measurement, and practice* (pp. 127-167). Washington, DC: American Psychological Association
- Karatekin, C. (2008). Eye tracking studies of normative and atypical development. In C. A. Nelson & M. Luciana (Eds), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (2nd ed., pp. 263-299). Cambridge, MA: MIT Press.
- Karmiloff-Smith, A. (2010). Neuroimaging of the developing brain: Taking developing seriously (English). *Human Brain Mapping*, 31(6), 934-941.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2003). *NEPSY: Bilan neuropsychologique de l'enfant*. Paris : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Kramer, A. F., Gonzalez de Sather, J. M., & Cassavaugh, N. D. (2005). Development of attentional and oculomotor control. *Developmental Psychology*, 41(5), 760-772.
doi: 10.1037/0012-1649.41.5.760
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59-80.

- Loe, I. M., Luna, B., Bledsoe, I. O., Yeom, K. W., Fritz, B. L., & Feldman, H. M. (2012). Oculomotor assessments of executive function in preterm children. *The Journal of Pediatrics*, 161(3), 427-433. doi: 10.1016/j.jpeds.2012.02.037
- Luna, B., Velanova, K., & Geier, C. F. (2008). Development of eye-movement control. *Brain and Cognition*, 68(3), 293-308. doi: 10.1016/j.bandc.2008.08.019
- Manly, T., Anderson, V., Nimmo-Smith, I., Turner, A., Watson, P., & Robertson, I. H. (2001). The differential assessment of children's attention: The Test of Everyday Attention for Children (TEA-Ch), normative sample and ADHD performance. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 42, 1065-1081.
- Manly, T., Robertson, I. H., Anderson, V., & Nimmo-Smith, I., (2006). *Test d'évaluation de l'attention chez l'enfant*. Paris : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- McCormack, T., & Atance, C. M. (2011). Planning in young children: A review and synthesis. *Developmental Review*, 31(1), 1-31. doi: 10.1016/j.dr.2011.02.002
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1), 8-14. doi: 10.1177/0963721411429458
- Nieuwenhuis, S., Broerse, A., Nielen, M. M. A., & de Jong, R. (2004). A goal activation approach to the study of executive function: An application to antisaccade tasks. *Brain and Cognition*, 56(2), 198-214. doi: 10.1016/j.bandc.2003.12.002

- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 220-246.
- Salvucci, D. D. (1999). Mapping eye movements to cognitive processes. (Order No. 9950036, Carnegie Mellon University). ProQuest Dissertations and Theses, 195 p. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/304499066?accountid=14725>. (304499066).
- Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: A conceptual view. *Psychological Research*, 63(3-4), 289-298.
- Wiebe, S. A., Espy, K. A., & Charak, D. (2008). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: I Latent structure. *Developmental Psychology*, 44(2), 575-587.
- Zelazo, P. D., Carter, A., Reznick, J. S., & Frye, D. (1997). Early development of executive function: A problem-solving framework. *Review of General Psychology*, 1(2), 198-226.
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2011). Executive function in typical and atypical development. In U. Goswami (Ed.), *Handbook of childhood cognitive development* (pp. 574-603). Oxford: Blackwell.

Discussion générale

L'objectif général de la recherche présentée visait à mieux comprendre comment se développe l'inhibition chez les enfants âgés de 5 à 8 ans. Pour ce faire, des épreuves de traquage oculaire et des épreuves psychométriques ont été administrées à un échantillon de quarante-six enfants âgés entre 5 ans et 8 mois et 8 ans et 5 mois. Les résultats ont démontré une corrélation entre l'âge et les performances à l'épreuve *marche-arrête*. De plus, une corrélation entre l'âge et la proportion de bonnes réponses aux deux épreuves oculométriques d'inhibition a également pu être observée. Ces corrélations entre l'âge et les performances aux épreuves d'inhibition indiquent que la capacité d'inhibition augmente dans la tranche d'âge ciblée.

Pour la discussion reliée aux trois objectifs visés par la recherche, le lecteur peut se référer à l'article publié inclus dans le présent essai. Les points de discussion qui seront abordés sont plus généraux et incluent les limitations de cette recherche ainsi que les perspectives d'études futures.

Tout d'abord, il n'existe que peu de recherche employant des paradigmes d'AS concernant des populations de participants âgés de moins de 8 ans (Luna et al., 2008). La présente étude a permis de démontrer que dès 5 ans, les performances des enfants progressent et méritent d'être étudiées. Une autre recherche vient également appuyer cette constatation (Everling, & Fischer, 1998). De plus, dans d'éventuelles recherches avec des jeunes enfants, il pourrait être pertinent de leur présenter des paradigmes sous des formats plus ludiques. Durston et al. (2002) utilisaient un matériel avec des stimuli

illustrés de différents *Pokemon*, au lieu de présenter de simples points apparaissant sur l'écran.

Deux des épreuves neuropsychologiques utilisées dans la présente recherche ont démontré d'importants effets plafonds. Ces deux épreuves évaluent l'inhibition motrice par l'intermédiaire d'épreuves motrices simples. Comme le mentionnent Garon et ses collègues (2008), dès un très jeune âge, les enfants en arrivent à une performance maximale à ces épreuves. Ce point soulève le manque de sensibilité de ce type d'épreuves tant en recherche qu'en clinique. Devant ce constat, il semble plus pertinent, pour évaluer l'inhibition motrice, d'utiliser des épreuves présentées sur ordinateur, car celles-ci permettent de mesurer précisément les temps de réaction (par exemple, le *Conners' Continuous Performance Test II*; Conners, 2004). Ces tâches sont plus discriminantes sur le plan de la performance, car le fait de mesurer précisément les temps de réaction de l'enfant, permet de situer ce dernier par rapport à la norme de sa tranche d'âge. Une autre avenue pour contourner le manque de sensibilité des tests neuropsychologiques d'inhibition motrice, aurait été d'utiliser des épreuves faisant appel à l'inhibition comportementale plutôt que l'inhibition motrice. Des épreuves comme *Inhibition* de la NEPSY-II (normé pour les enfants de 5 à 16 ans; Korkman et al., 2012) et *Cartes avec changement de règle* de la BADS-C (normée de 8 à 15 ans; Emslie, 2003) auraient pu être pertinentes avec les participants de notre échantillon. Ces tâches demandent des réponses verbales, mais ne nécessitent pas de lecture. En effet, *Inhibition* nécessite de la reconnaissance des formes (ronds et carrés), alors que *Cartes avec*

changement de règle fait appel à la connaissance des couleurs et à la capacité d'évocation verbale du stimulus ou de son contraire. De plus, ces épreuves exercent une demande minimale en MdT, car elle n'exige que de consigne simple : se souvenir qu'il faut dire le contraire de ce qu'est le stimulus présenté (*Inhibition*) ou mémoriser une règle simple, sans tenir compte de la règle apprise précédemment (*Cartes avec changement de règle*).

Dans l'article inclus dans cet essai, une corrélation positive et significative a été observée entre la mise en place d'une stratégie par certains enfants à une épreuve oculométrique et la réussite à l'épreuve *marche-arrête* a été mesurée. Ce résultat a été nommé comme ayant probablement été accidentel. Toutefois, une autre explication possible serait qu'une portion de la variance de la mise en place de cette stratégie s'explique par des variables génétiques qui sont stables dans le développement. Ainsi, comme le suggèrent Friedman et ses collègues (2008), il est probable que cette caractéristique ne se modifie pas avec le temps. Il serait indiqué pour tester cette hypothèse d'effectuer, dans une recherche future, des mesures répétées dans un format de recherche longitudinale, de manière à quantifier si, effectivement, cet aspect de l'inhibition est stable dans le temps.

De manière plus générale, le peu de corrélations entre les épreuves d'inhibition motrice et d'inhibition oculomotrice montre que comme le supposait Nigg (2000), ces deux types d'inhibition sont bel et bien distincts. Friedman et Miyake (2004) en

arrivaient aussi à une conclusion similaire en étudiant un échantillon d'adultes. Il semble donc essentiel, comme le suggère Hutton et Ettinger (2006), que les chercheurs étudiant l'inhibition par l'intermédiaire de paradigme d'AS ne généralisent pas leur résultat à d'autres types d'inhibition.

Deux épreuves oculométriques ont été employées dans la phase expérimentale du présent essai. Une différence en demande de MdT était apparemment la seule différence entre ces épreuves. Ainsi, une épreuve exigeait de fixer le centre de l'écran lors de l'apparition de la cible tandis que l'autre nécessitait de regarder du côté de l'écran opposé à la cible. L'absence de différences significative entre les résultats des participants aux deux tâches suggèrent que la complexité de la consigne, et donc de la demande en MdT, n'a pas de réel impact sur les capacités d'inhibition oculomotrice. Cette observation va de pair avec celle de Davidson et ses collègues (2006) qui n'observent aucun effet significatif sur la demande en MdT chez les enfants âgés de moins de 13 ans dans d'autres types d'épreuves d'inhibition. Il semble donc que, peu importe le type d'inhibition évalué, ce serait bel et bien après l'âge de 13 ans que la demande en MdT diminue les performances aux épreuves d'inhibition, mais pas avant.

Dans l'interprétation de nos résultats, nous devons souligner la petitesse de notre échantillon. Ceci constitue une réelle limitation, car des analyses plus pertinentes en fonction de nos objectifs n'ont pu être réalisées. Ainsi, avec un échantillon plus important, des analyses factorielles, comme celles réalisées par Friedman et Miyake

(2004), auraient pu évaluer si un modèle à plusieurs facteurs se démarquait et expliquait mieux les résultats entre les différentes performances d'inhibition de notre recherche qu'un modèle à un seul facteur.

Néanmoins, malgré les limites mentionnées ici, il demeure que notre recherche a permis d'évaluer l'inhibition via plusieurs types de mesures, tel que suggéré par Karmiloff-Smith (2010). Dans le recours aux meilleures pratiques, cette auteure rappelle que la convergence de mesures est toujours préférable pour circonscrire avec justesse le développement de l'enfant.

Conclusion générale

La recherche exploratoire présentée ici sous la forme d'un article scientifique visait à évaluer avec le plus de détails possible le développement de l'inhibition chez les enfants âgés de 5 à 8 ans. Pour ce faire, deux modes d'évaluation des fonctions cognitives ont été employés: des tests psychométriques et des épreuves oculométriques. Ce sont donc les performances de quarante-six enfants âgés entre 5 ans et 8 mois et 8 ans et 5 mois qui ont finalement été enregistrées et analysées.

Le premier objectif de la recherche était d'évaluer et de comparer les performances des enfants selon leur âge. Les résultats suggèrent que le test psychométrique *marche-arrête* de la batterie TEA-CH (Manly et al., 2006) est sensible à l'augmentation de la capacité d'inhibition des enfants avec l'âge. En ce qui concerne les épreuves présentées par l'intermédiaire d'un traqueur oculaire, les performances aux deux tâches oculométriques étaient corrélées modérément avec l'âge. Ces résultats suggèrent donc qu'entre les âges de 5 et 8 ans, l'inhibition motrice et l'inhibition oculomotrice progressent avec le développement de l'enfant.

Le deuxième objectif était d'évaluer si les performances aux épreuves d'inhibition se développent de manière similaire tant aux tâches psychométriques qu'aux tâches oculométriques. La seule corrélation significative et positive observée, même en excluant l'influence de l'âge de l'équation, concernait les performances à une tâche psychométrique et à un type d'erreurs spécifiques. Ce résultat suggère qu'une bonne performance à une tâche psychométrique est liée à la capacité de mettre en

place une stratégie qui permet d'éviter de commettre des erreurs à une tâche oculométrique. Le fait que cette capacité apparaisse invariable en fonction de l'âge amène à penser, comme Friedman et ses collègues (2008), qu'une part de l'inhibition pourrait être expliquée par des facteurs génétiques.

Finalement, le troisième objectif était de comparer spécifiquement les deux tâches oculométriques. La différence de performance aux deux tâches s'est avérée non significative, suggérant que la complexité de la consigne n'affectait probablement pas les performances. Il semblerait donc que les capacités en MdT n'influencent pas significativement la capacité d'inhiber les saccades réflexives des enfants âgés entre 5 et 8 ans.

La présente recherche contribue à la compréhension des performances à une tâche psychométrique et à deux tâches oculométriques et sur le fait que celles-ci s'améliorent avec l'âge. Toutefois, les liens entre les types de performance sont peu nombreux, ce qui supporte la thèse de Friedman et Miyake (2004), qui suggère que l'inhibition est bel et bien un concept non unitaire. Ainsi, il est fortement recommandé aux chercheurs qui étudieront cette FE à l'avenir, de bien définir lequel des différents types d'inhibition ils comptent évaluer, avant d'effectuer leurs analyses. De plus, au moment d'interpréter leurs résultats, ils doivent éviter de généraliser ceux-ci à d'autres types d'inhibition.

Références

- Anderson, V., Levin, H. S., & Jacobs, R. (Éds). (2002). *Executive functions after frontal lobe injury: A developmental perspective*. New York: Oxford University Press.
- Ayduk, O., Mendoza-Denton, R., Mischel, W., Downey, G., Peake, P. K., & Rodriguez, M. (2000). Regulating the interpersonal self: Strategic self-regulation for coping with rejection sensitivity. *Journal of Personality and Social Psychology*, 79(5), 776-792.
- Baddeley, A. D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7(2), 85-97. doi: 10.1027//1016-9040.7.2.85
- Barkley, R. A. (2012). *Executive functioning and self-regulation: Extended phenotype, synthesis, and clinical implications*. New York, NY: Guilford Press.
- Barry, R. J., & De Blasio, F. M. (2015). Performance and ERP components in the equiprobable go/no-go task: Inhibition in children. *Psychophysiology*, 52(9), 1228-1237. doi: 10.1111/psyp.12447
- Berthier, N. E., DeBlois, S., Poirier, C. R., Novak, M. A., & Clifton, R. K. (2000). Where's the ball? Two- and three-year-olds reason about unseen events. *Developmental Psychology*, 36(3), 394-401. doi: 10.1037/0012-1649.36.3.394
- Brock, L. L., Rimm-Kaufman, S. E., Nathanson, L., & Grimm, K. J. (2009). The contributions of 'hot' and 'cool' executive function to children's academic achievement, learning-related behaviors, and engagement in kindergarten. *Early Childhood Research Quarterly*, 24(3), 337-349.
- Bryce, D., Szűcs, D., Soltész, F., & Whitebread, D. (2011). The development of inhibitory control: An averaged and single-trial lateralized readiness potential study. *NeuroImage*, 57(3), 671-685. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.12.006
- Carlson, S. M. (2005). developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 595-616. doi:10.1207/s15326942dn2802_3
- Christ, S. E., White, D., Brunstrom, J. E., & Abrams, R. A. (2003). Inhibitory control following perinatal brain injury. *Neuropsychology*, 17(1), 171-178. doi: 10.1037/0894-4105.17.1.171
- Christ, S. E., White, D. A., Mandernach, T., & Keys, B. A. (2001). Inhibitory control across the life span. *Developmental Neuropsychology*, 20(3), 653-669. doi: 10.1207/875656401753549852

- Clementz, B. A., McDowell, J. E., & Zisook, S. (1994). Saccadic system functioning among schizophrenia patients and their first-degree biological relatives. *Journal of Abnormal Psychology, 103*(2), 277-287. doi: 10.1037/0021-843X.103.2.277
- Cohen, J. D., Aston-Jones, G., & Gilzenrat, M. S. (2004). A systems-level perspective on attention and cognitive control: Guided activation, adaptive gating, conflict monitoring, and exploitation versus exploration. Dans M. I. Posner (Éd), *Cognitive neuroscience of attention* (pp. 71-90). New York, NY: Guilford Press.
- Conners, C. K. (2004). *Conners' Continuous Performance Test II*. North Tonawanda: Multi-Health systems.
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia, 44*(11), 2037-2078.
- Delis, D. C., Kaplan E. & Kramer, J. H. (2001). Delis-Kaplan executive function system (D-KEFS). San Antonio, Tex. : Psychological Corp.
- Diamond, A. (1990). The development and neural bases of memory functions as indexed by the AB and delayed response tasks in human infants and infant monkeys. *Annals of the New York Academy of Sciences, 608*, 267-317.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168.
- Diamond, A., & Doar, B. (1989). The performance of human infants on a measure of frontal cortex function, the delayed response task. *Developmental Psychobiology, 22*, 271-294.
- Diamond, A., & Goldman-Rakic, P. S. (1985). Evidence for involvement of prefrontal cortex in cognitive changes during the first year of life: Comparison of performance of human infants and rhesus monkeys on a detour task with transparent barrier. In *Soc Neurosci Abstr* (Vol. 11, p. 832).
- Diamond, A., Kirkham, N., & Amso, D. (2002). Conditions under which young children can hold two rules in mind and inhibit a prepotent response. *Developmental Psychology, 38*(3), 352-362. doi: 10.1037/0012-1649.38.3.352
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science, 333*(6045), 959-964.

- Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34-48.
- Diamond, A., & Taylor, C. (1996). Development of an aspect of executive control: Development of the abilities to remember what I said and to 'Do as I say, not as I do.'. *Developmental Psychobiology*, 29(4), 315-334. doi: 10.1002/(SICI)1098-2302(199605)29:4<315::AID-DEV2>3.0.CO;2-T
- Durstun, S., Thomas, K. M., Yang, Y., Uluğ, A. M., Zimmerman, R. D., & Casey, B. J. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5(4), F9-F16. doi: 10.1111/1467-7687.00235
- Emslie, H. (2003). *Behavioural assessment of the dysexecutive syndrome for children*. London : Harcourt assessment.
- Espy, K. A. (1997). The shape school: Assessing executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 13(4), 495-499. doi: 10.1080/87565649709540690
- Everling, S., & Fischer, B. (1998). The antisaccade: A review of basic research and clinical studies. *Neuropsychologia*, 36(9), 885-899.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 101-135.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Robinson, J. L., & Hewitt, J. K. (2011). Developmental trajectories in toddlers' self-restraint predict individual differences in executive functions 14 years later: A behavioral genetic analysis. *Developmental Psychology*, 47(5), 1410-1430.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201-225. doi: 10.1037/0096-3445.137.2.201
- Fukushima, J., Hatta, T., & Fukushima, K. (2000). Development of voluntary control of saccadic eye movements I. Age-related changes in normal children. *Brain & Development*, 22(3), 173-180. doi: 10.1016/S0387-7604(00)00101-7
- Gandolfi, E., Viterbori, P., Traverso, L., & Usai, M. C. (2014). Inhibitory processes in toddlers: A latent-variable approach. *Frontiers in Psychology*, 5, 381. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00381.

- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31-60. doi: 10.1037/0033-2909.134.1.31
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: Performance of children 3 ½ -7 years old on a Stroop-like day-night test. *Cognition*, 53(2), 129-153. doi: 10.1016/0010-0277(94)90068-X
- Harnishfeger, K. K. (1995). The development of cognitive inhibition: Theories, definitions, and research evidence. Dans F. N. Dempster & C. J. Brainerd (Éds), *Interference and inhibition in cognition* (pp. 175-204). San Diego, CA: Academic Press. doi: 10.1016/B978-012208930-5/50007-6
- Harnishfeger, K. K., & Bjorklund, D. F. (1993). The ontogeny of inhibition mechanisms: A renewed approach to cognitive development. Dans M. L. Howe & R. Pasnak (Éds), *Emerging themes in cognitive development*, vol. I: Foundations (pp. 28-49). New York, NY Springer-Verlag.
- Holmboe, K., Fearon, R. P., Csibra, G., Tucker, L. A., & Johnson, M. H. (2008). Freeze-frame: A new infant inhibition task and its relation to frontal cortex tasks during infancy and early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 100(2), 89-114. doi: 10.1016/j.jecp.2007.09.004
- Hongwanishkul, D., Happaney, K. R., Lee, W. S. C., & Zelazo, P. D. (2005). Assessment of hot and cool executive function in young children: Age-related changes and individual differences. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 617-644. doi: 10.1207/s15326942dn2802_4
- Hutton, S. B., & Ettinger, U. (2006). The antisaccade task as a research tool in psychopathology: A critical review. *Psychophysiology*, 43(3), 302-313. doi: 10.1111/j.1469-8986.2006.00403.x
- Jenkins, I. L., & Berthier, N. E. (2014). Working memory and inhibitory control in visually guided manual search in toddlers. *Developmental Psychobiology*, 56(6), 1252-1262. doi: 10.1002/dev.21205
- Johnson, M. H. (1995). The inhibition of automatic saccades in early infancy. *Developmental Psychobiology*, 28(5), 281-291. doi: 10.1002/dev.420280504
- Jongen, E. M., & Jonkman, L. M. (2008). The developmental pattern of stimulus and response interference in a color-object Stroop task: an ERP study. *BMC Neuroscience*, 9(1). doi: 10.1186/1471-2202-9-82

- Kaplan, E. (1988). A process approach to neuropsychological assessment. Dans T. Boll & B. K. Bryant (Éds), *Clinical neuropsychology and brain function: Research, measurement, and practice* (pp. 127-167). Washington, DC: American Psychological Association.
- Karatekin, C. (2008). Eye tracking studies of normative and atypical development. Dans C. A. Nelson & M. Luciana (Éds), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (2^e éd., pp. 263-299). Cambridge, MA: MIT Press.
- Karmiloff-Smith, A. (2006). The tortuous route from genes to behavior: A neuroconstructivist approach. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 6(1), 9-17. doi: 10.3758/cabn.6.1.9
- Karmiloff-Smith, A. (2010). Neuroimaging of the developing brain: Taking developing seriously (English). *Human Brain Mapping*, 31(6), 934-941.
- Klein, C. (2001). Developmental functions for saccadic eye movement parameters derived from pro-and antisaccade tasks. *Experimental Brain Research*, 139(1), 1-17.
- Klenberg, L., Korkman, M., & Lahti-Nuuttila, P. (2001). Differential development of attention and executive functions in 3- to 12-year-old Finnish children. *Developmental Neuropsychology*, 20(1), 407-428.
- Knight, R. T., & Stuss, D. T. (2002). Prefrontal cortex: The present and the future. Dans D. T. Stuss & R. T. Knight (Éds), *Principles of frontal lobe function* (pp. 573-597). Oxford: Oxford University Press.
- Kochanska, G., Murray, K., & Coy, K. C. (1997). Inhibitory control as a contributor to conscience in childhood: From toddler to early school age. *Child Development*, 68(2), 263-277. doi: 10.2307/1131849
- Kochanska, G., Murray, K., & Harlan, E. T. (2000). Effortful control in early childhood: Continuity and change, antecedents, and implications for social development. *Developmental Psychology*, 36(2), 220-232. doi: 10.1037/0012-1649.36.2.220
- Kochanska, G., Murray, K., Jacques, T. Y., Koenig, A. L., & Vandegeest, K. A. (1996). Inhibitory control in young children and its role in emerging internalization. *Child Development*, 67(2), 490-507. doi: 10.2307/1131828
- Kochanska, G., Tjebkes, T. L., & Forman, D. R. (1998). Children's emerging regulation of conduct: Restraint, compliance, and internalization from infancy to the second year. *Child Development*, 69(5), 1378-1389. doi: 10.2307/1132272

- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2003). *NEPSY: Bilan neuropsychologique de l'enfant*. Paris : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2012). *NEPSY-II: Bilan neuropsychologique de l'enfant* (2^e éd.). Montreuil: Pearson, France ECPA.
- Kramer, A. F., Gonzalez de Sather, J. C. M., & Cassavaugh, N. D. (2005). Development of attentional and oculomotor control. *Developmental Psychology*, 41(5), 760-772. doi: 10.1037/0012-1649.41.5.760
- Kraus, M. F., Little, D. M., Donnell, A. J., Reilly, J. L., Simonian, N., & Sweeney, J. A. (2007). Oculomotor function in chronic traumatic brain injury. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 20(3), 170-178.
- Kuhn, L. J., Willoughby, M. T., Wilbourn, M. P., Vernon-Feagans, L., & Blair, C. B. (2014). Early communicative gestures prospectively predict language development and executive function in early childhood. *Child development*, 85(5), 1898-1914.
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59-80.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Bigler, E. D., & Tranel, D. (2012). *Neuropsychological assessment* (5^e éd.). New York, NY: Oxford University Press.
- Loe, I. M., Luna, B., Bledsoe, I. O., Yeom, K. W., Fritz, B. L., & Feldman, H. M. (2012). Oculomotor assessments of executive function in preterm children. *The Journal of Pediatrics*, 161(3), 427-433. doi: 10.1016/j.jpeds.2012.02.037
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child development*, 75(5), 1357-1372.
- Luna, B., Velanova, K., & Geier, C. F. (2008). Development of eye-movement control. *Brain and Cognition*, 68(3), 293-308. doi: 10.1016/j.bandc.2008.08.019
- Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. Oxford, England: Basic Books.
- Mainville, M., Brisson, J., Nougrou, F., Stipanovic, A., & Sirois, S. (2015). Inhibition development: Comparison of neuropsychological and eye tracking measures. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento*, 7(1), 17-25.

- Manfra, L., Davis, K. D., Ducenne, L., & Winsler, A. (2014). Preschoolers' motor and verbal self-control strategies during a resistance-to-temptation task. *Journal of Genetic Psychology, 175*(4), 332-345.
- Manly, T., Robertson, I. H., Anderson, V., & Nimmo-Smith, I., (2006). *Test d'évaluation de l'attention chez l'enfant*. Paris : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- McAuley, T., Christ, S. E., & White, D. A. (2011). Mapping the development of response inhibition in young children using a modified day-night task. *Developmental Neuropsychology, 36*(5), 539-551. doi: 10.1080/87565641.2010.549871
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science, 21*(1), 8-14. doi: 10.1177/0963721411429458
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex 'frontal lobe' tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology, 41*(1), 49-100. doi: 10.1006/cogp.1999.0734
- Miyake, A., Friedman, N. P., Rettinger, D. A., Shah, P., & Hegarty, M. (2001). How are visuospatial working memory, executive functioning, and spatial abilities related? A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General, 130*(4), 621-640. doi: 10.1037/0096-3445.130.4.621
- Munoz, D. P., Broughton, J. R., Goldring, J. E., & Armstrong, I. T. (1998). Age-related performance of human subjects on saccadic eye movement tasks. *Experimental Brain Research, 121*(4), 391-400.
- Nakagawa, A., & Sukigara, M. (2007). Infant eye and head movements toward the side opposite the cue in the anti-saccade paradigm. *Behavioral and Brain Functions, 3*(1), 1.
- Nieuwenhuis, S., Broerse, A., Nielen, M. M. A., & de Jong, R. (2004). A goal activation approach to the study of executive function: An application to antisaccade tasks. *Brain and Cognition, 56*(2), 198-214. doi: 10.1016/j.bandc.2003.12.002
- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin, 126*(2), 220-246.

- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children* (Vol. 8, No. 5). New York, NY: International Universities Press. doi: 10.1037/11494-000
- Piaget, J. (1954). *The construction of reality in the child*. New York: Basic Books.
- Saby, J. N., & Marshall, P. J. (2012). The utility of EEG band power analysis in the study of infancy and early childhood. *Developmental Neuropsychology*, 37(3), 253-273. doi: 10.1080/87565641.2011.614663
- Salman, M. S., Sharpe, J. A., Eizenman, M., Lillakas, L., Westall, C., To, T., ... Steinbach, M. J. (2006). Saccades in children. *Vision research*, 46(8), 1432-1439.
- Scerif, G., Karmiloff-Smith, A., Campos, R., Elsabbagh, M., Driver, J., & Cornish, K. (2005). To look or not to look? Typical and atypical development of oculomotor control. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(4), 591-604.
- Simpson, A., & Riggs, K. J. (2005). Inhibitory and working memory demands of the day-night task in children. *British Journal of Developmental Psychology*, 23(3), 471-486. doi: 10.1348/026151005X28712
- Simpson, A., Riggs, K. J., Beck, S. R., Gorniak, S. L., Wu, Y., Abbott, D., & Diamond, A. (2012). Refining the understanding of inhibitory processes: How response prepotency is created and overcome. *Developmental Science*, 15(1), 62-73. doi: 10.1111/j.1467-7687.2011.01105.x
- Smidts, D. P. (2003). *Development of executive processes in early childhood* (Thèse de doctorat inédite). Université de Melbourne, Australie.
- Sohlberg, M. M., & Mateer, C. A. (2001). *Cognitive rehabilitation: An integrative neuropsychological approach*. New York, NY: Guilford Press.
- Stets, M., Stahl, D., & Reid, V. M. (2012). A meta-analysis investigating factors underlying attrition rates in infant ERP studies. *Developmental Neuropsychology*, 37(3), 226-252. doi: 10.1080/87565641.2012.654867
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662.
- Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: A conceptual view. *Psychological Research*, 63(3-4), 289-298.

- Stuss, D. T., Shallice, T., Alexander, M. P., & Picton, T. (1995). A multidisciplinary approach to anterior attentional functions. Dans J. Grafman, K. J. Holyoak, F. Boller, J. Grafman, K. J. Holyoak, & F. Boller (Éds), *Structure and functions of the human prefrontal cortex* (pp. 191-211). New York, NY: New York Academy of Sciences
- Torpey, D. C., Hajcak, G., Kim, J., Kujawa, A., & Klein, D. N. (2012). Electroocortical and behavioral measures of response monitoring in young children during a go/no-go task. *Developmental Psychobiology*, 54(2), 139-150.
- Votruba, K. L., & Langenecker, S. A. (2013). Factor structure, construct validity, and age-and education-based normative data for the Parametric Go/No-Go Test. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 35(2), 132-146.
- Wiebe, S. A., Espy, K. A., & Charak, D. (2008). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: I Latent structure. *Developmental Psychology*, 44(2), 575-587.
- Wiebe, S. A., Sheffield, T. D., & Espy, K. A. (2012). Separating the fish from the sharks: A longitudinal study of preschool response inhibition. *Child Development*, 83(4), 1245-1261. doi: 10.1111/j.1467-8624.2012.01765.x
- Wiebe, S. A., Sheffield, T., Nelson, J. M., Clark, C. A., Chevalier, N., & Espy, K. A. (2011). The structure of executive function in 3-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 436-452.
- Zelazo, P. D., & Carlson, S. M. (2012). Hot and cool executive function in childhood and adolescence: Development and plasticity. *Child Development Perspectives*, 6(4), 354-360.
- Zelazo, P. D., Carter, A., Reznick, J. S., & Frye, D. (1997). Early development of executive function: A problem-solving framework. *Review of General Psychology*, 1(2), 198-226.
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2011). Executive function in typical and atypical development. In U. Goswami (Ed.), *Handbook of childhood cognitive development* (pp. 574-603). Oxford: Blackwell
- Zelazo, P. D., Müller, U., Frye, D., & Marcovitch, S. (2003). The Development of executive function. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 68(3), 1-27. doi:10.1111/j.0037-976X.2003.00261.x

Appendice A
Tableau 1

Tableau 1

Description des tâches d'inhibition présentées dans l'essai

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Stroop</i>	Stroop, 1935	La tâche de <i>Stroop</i> demande de lire des mots, puis de nommer des couleurs (conditions 1 et 2).	1 ^{re} et 2 ^e condition : rapidité de dénomination
		Ensuite, il faut dire la couleur de l'encre de noms de couleurs écrits d'une couleur différente. Ainsi, un adulte verrait le mot « mauve » écrit en encre grise et devrait dire le plus rapidement possible « gris » (condition 3).	3 ^e condition : Inhibition d'une réponse dominante (IRD).
		Enfin, une dernière condition (4) implique d'alterner entre la condition de lecture des mots et celle de la dénomination de la couleur de l'encre.	4 ^e condition : flexibilité
<i>Stop-Signal</i>	Friedman & Miyake, 2004	Après l'apprentissage d'un genre de réponse à émettre (par exemple : catégoriser des mots d'une manière spécifique), les participants doivent inhiber cette réponse lorsqu'ils entendent un signal sonore.	IRD
<i>Eriksen Flanker</i>	Friedman & Miyake, 2004	Les participants doivent identifier une lettre-cible située au milieu d'autres lettres qui servent de distracteurs.	RI

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Dénomination de noms</i> (<i>Word naming</i>)	Friedman & Miyake, 2004	Les participants doivent identifier un mot-cible situé seul ou à côté d'un autre mot qui sert de distracteur.	RI
<i>Agencement de formes</i> (<i>Shape matching</i>)	Friedman & Miyake, 2004	Les participants doivent identifier si une forme-cible est similaire à un modèle alors qu'elle est située seule ou à côté d'une autre forme qui sert de distracteur.	RI
Variante du <i>Brown–Peterson</i>	Friedman & Miyake, 2004	Les participants apprennent des listes successives de mots qu'ils doivent se rappeler par la suite et qui sont composées de mots de la même catégorie	RIP
<i>AB–AC–AD</i>	Friedman & Miyake, 2004	Les participants apprennent des paires de mots où un premier est apparié à un mot-indice. Quand un certain seuil d'apprentissage est atteint, ils apprennent une nouvelle liste qui où de nouveaux mots sont appariés aux mêmes mots-indices que la liste précédente	RIP
<i>Rappel indicé</i> (<i>Cued recall</i>)	Friedman & Miyake, 2004	Les participants apprennent deux listes de quatre mots et doivent ensuite se rappeler la liste la plus récente en fonction d'un indice et faire abstraction des listes précédentes.	RIP

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Marche-arrête</i> (<i>Walk Don't Walk</i>)	Manly et al., 2006	Le participant avance son crayon le long d'un trajet fait de cases successives. À chaque fois qu'il entend un son court (« marche »), il avance d'une case. Lorsqu'il entend un son débutant de la même manière que le son court, mais se terminant différemment (« arrête »), il ne doit pas avancer le tracé de son crayon. À chaque essai de la tâche, le participant entend plusieurs sons consécutifs de type « marche » (entre trois et quatorze, sans ordre prévisible) avant la présentation du son « arrête », et ce, pendant vingt essais à une vitesse de traitement croissante.	Inhibition motrice de la réponse fréquente et bien apprise lorsque le participant entend le stimulus « arrête ».
<i>Cogner-frapper</i> (<i>Knock –Tap</i>)	Korkman et al., 2003	<p>1^{re} partie : l'enfant doit faire le mouvement contraire de l'examineur, c'est-à-dire, cogner avec le poing fermé quand l'examineur frappe avec la main ouverte et vice versa.</p> <p>2^e partie : la règle est modifiée, l'enfant doit maintenant poser sa main sur le côté de la paume quand l'examineur cogne, cogner quand l'examineur pose sa main sur la tranche et ne pas émettre de réponse quand l'examineur frappe avec la main ouverte.</p>	<p>1^{re} partie : inhibition de la réponse motrice dominante (imitation de l'examineur)</p> <p>2^e partie : inhibition de la réponse motrice dominante (règles apprises précédemment)</p>

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Go/No-Go</i>	Christ et al., 2003; Davidson et al., 2006; Simpson, & Riggs, 2005; Torpey et al., 2012; Wiebe et al., 2012.	Il existe plusieurs variations de cette tâche. Généralement, les participants doivent émettre une réponse motrice (ex : appuyer sur un bouton) lors de la présentation d'un premier stimulus fréquent (environ 70 % des essais). Lors de la présentation d'un second stimulus pré-identifié, les participants doivent inhiber la réponse motrice (ex : ne pas appuyer sur le bouton; environ 30 % des occurrences).	Inhibition motrice
<i>Inhibition</i>	Korkman et al., 2012	1 ^{re} condition : les enfants doivent nommer des formes représentées sur une planche (des ronds et des carrés, noirs ou blancs), le plus rapidement possible et sans faire d'erreurs.	1 ^{re} condition : rapidité de dénomination
		2 ^e condition : les enfants doivent nommer la forme contraire de celle qu'ils voient (dire « carré » lorsqu'ils voient un rond et vice versa), le plus rapidement possible et sans faire d'erreurs. (Les enfants âgés de 5 à 6 ans ne font que les deux premières conditions.)	2 ^e condition : inhibition d'une réponse dominante
		Dans la 3 ^e condition, selon la couleur des formes, les enfants doivent soit dire leur forme réelle, soit dire le contraire.	3 ^e condition : inhibition d'une réponse dominante et flexibilité/alternance

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Statue</i>	Korkman et al., 2012	Tâche où l'enfant a pour seule consigne de ne pas bouger pendant 75 secondes, en dépit de quelques distractions de l'examineur (échapper un crayon, éternuer, etc.).	Test d'inhibition motrice simple
<i>Gratification différée</i>	Kochanska et al., 1998	Tâche où la récompense est une friandise. On présente une friandise à l'enfant et on lui explique qu'un choix s'offre à lui. Il peut la manger immédiatement ou attendre un délai prédéterminé, et en obtenir deux (ou une plus grosse).	Inhibition d'un comportement dominant
Récupération d'un objet dans un contenant translucide	Diamond, 1990	L'enfant doit aller chercher un objet situé dans un contenant translucide situé devant lui. Le contenant ne comporte qu'une ouverture latérale que l'enfant ne voit pas directement. L'enfant doit inhiber l'action d'aller chercher le jouet directement par le dessus du contenant.	Inhiber un mouvement de préhension inefficace et chercher une solution alternative
Tâche <i>A-Non-B</i>	Diamond & Goldman-Rakic, 1985; Piaget, 1954	Un objet intéressant est dissimulé à un de deux endroits possibles. Lorsque l'enfant a réussi à trouver l'objet, il est changé de place. L'objet doit être retrouvé là où il a été caché et non pas à l'endroit où il a été retrouvé à l'essai précédent.	Inhibition de la réponse apprise précédemment

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Tâche de réponse différée (Delayed Response task)</i>	Diamond & Doar, 1989	Un objet intéressant est dissimulé à un de deux endroits possibles. Habituellement, l'objet est changé de cachette après avoir été retrouvé, mais parfois il est caché au même endroit. Un délai plus ou moins long suit ensuite, avant que l'enfant puisse aller chercher l'objet.	Inhibition de la réponse apprise précédemment et mémorisation du bon endroit pour une certaine durée de temps.
<i>Catégorisation inversée (Reverse Categorization)</i>	Carlson, 2005	L'enfant doit mettre des petits blocs dans une petite chaudière et des gros blocs dans une grosse chaudière. Ensuite, dans une deuxième phase, les petits blocs doivent être mis dans la grosse chaudière et vice versa.	Inhiber une règle apprise préalablement
<i>Jeu du dragon et de l'ours</i>	Carlson, 2005	L'enfant est en présence de deux marionnettes, mais ne doit exécuter que les consignes données par l'une et ignorer les consignes de la seconde.	Inhibition motrice en fonction de l'émetteur.
<i>Tour (Tower)</i>	Kochanska et al., 1996	L'enfant construit une tour de vingt blocs avec l'expérimentateur et chacun place un bloc à tour de rôle. Au début, l'adulte verbalise la consigne. Par la suite, il ne le fait plus, mais l'enfant doit toujours attendre que l'expérimentateur ait placé un bloc avant d'en placer un.	Inhibition d'une réponse dominante (construire la tour sans attendre)

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Épreuve de classement de cartes (Dimensional Change Card Sort)</i>	Zelazo et al., 2003	Dans un premier temps, les enfants doivent trier une série de cartes selon un critère (par exemple, la couleur), puis, dans un deuxième temps, ils doivent trier la même série de cartes selon un autre critère (par exemple, la forme).	Inhibition de la règle préalable
<i>Tâche des goujons (The Three Pegs Task)</i>	Jenkins & Berthier, 2014	Les enfants doivent suivre une consigne verbale en touchant trois goujons de couleurs différentes, dans des ordres différents, selon ce que dictait l'expérimentateur, sans répéter les séries présentées préalablement.	Inhibition des réponses apprises précédemment
<i>Cogner</i>	Diamond & Taylor, 1996; Luria, 1966	Lorsque l'expérimentateur cogne la table une fois, l'enfant doit cogner deux fois et vice versa.	Inhibition de l'imitation de l'expérimentateur
<i>Neige-gazon (Grass-Snow)</i>	Carlson, 2005	Cette tâche demande des connaissances sémantiques préalables (connaître la couleur de la neige et du gazon). Les enfants doivent pointer un carreau blanc quand ils entendent gazon et vert quand ils entendent neige.	Inhibition de connaissances sémantiques
<i>Jour-nuit, version de 1994 (Day night)</i>	Gerstadt et al., 1994	Tâche qui fait appel aux connaissances sémantiques préalables des enfants au sujet du jour et de la nuit. Les enfants voient des cartes où une lune blanche sur fond noir est dessinée et ils doivent dire « jour. » Lorsqu'ils voient une carte avec un dessin d'un soleil sur fond blanc, ils doivent dire « nuit. »	Inhibition de connaissances sémantiques

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Jour-nuit</i> , version de 2005 (<i>Day night</i>)	Simpson & Riggs, 2005	Inspiré de la tâche de Day-Night (Gerstadt et al., 1994). Dans cette version de la tâche, en voyant l'image de lune les enfants devaient dire, par exemple, un « chien » ou lorsqu'ils voyaient l'image de soleil, les enfants devaient, par exemple, dire « cochon ».).	(Tâches destinées à voir si dire des mots non-contradictaires avec l'image rendait la tâche plus facile). Évalue la MdT
<i>Jour-nuit</i> , version de 2012 (<i>Day night</i>)	Simpson et al., 2012	Inspiré de la tâche de Gerstadt et al. (1994). Présente cinq conditions différentes dont deux sont différentes de celles nommées plus haut. Dans une 1 ^{re} condition de cette tâche, les mots à inhiber étaient sémantiquement proches des mots cibles (par exemple : dire « chien » lorsque l'enfant voit une image de chat). Dans une 2 ^e condition, des mots qui avaient déjà été des mots cibles se répétaient au cours d'essais subséquents de la tâche, mais n'étaient alors plus pertinents.	1 ^{re} condition : inhibition de mot sémantiquement proche des mots cibles. 2 ^e condition : inhibition d'une réponse préalablement pertinente
<i>L'école des formes</i> (<i>Shape School</i>)	Espy, 1997	1 ^{re} condition : dénomination de formes présentées dans un livre 2 ^e condition : les enfants doivent dénommer la forme ou pas, selon une caractéristique précise du dessin. 3 ^e condition : ils doivent alterner entre deux règles simples.	1 ^{re} condition : rapidité de dénomination 2 ^e condition : inhibition verbale. 3 ^e condition : flexibilité

Nom	Auteur(s)	Description	Capacité évaluée
<i>Cartes avec changement de règle</i> (<i>Rule Shift Cards</i> ; BADS-C)	Emslie, 2003	<p>1^{re} partie : l'examineur retourne des cartes à jouer et l'enfant doit dire « oui » quand les cartes sont rouges et « non » quand les cartes sont noires.</p> <p>2^e partie : la règle est modifiée, l'enfant doit maintenant dire « oui » quand la carte présentée est de la même couleur que la carte précédente et « non » quand la carte est d'une couleur différente à la précédente.</p>	<p>1^{re} partie : rapidité de dénomination (sert de taux de base pour comparer le « coût cognitif » de l'inhibition)</p> <p>2^e partie : inhibition de la réponse verbale apprise en 1^{re} partie et flexibilité de passer à la seconde règle.</p>

Appendice B

Normes de présentation de la revue *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento*

Author Guidelines

1. General considerations

The Argentinean Journal of Behavioral Sciences (AJBS) receives articles written in Spanish, English or Portuguese; however, the official language is Spanish. Manuscripts must be original and unpublished. Papers already published (as a whole or as a part) and those that are in the process of publication or under review in another journal will not be admitted.

Manuscripts (MS) must be prepared in PC or MAC and saved as .doc or open/libre office format. MS length depends on the type of article: 20 pages for empirical research papers (including first page, text, references, tables, and figures); 30 pages for theoretical or methodological review papers (only considering the main text); and 10 pages for short communications (only considering the main text). Manuscripts should be typed double-spaced on A4 paper size, margins of 3 cm, page number at the upper right, external alignment without using indented. Articles must be written in 12-point Time New Roman.

All manuscripts must be written according to the American Psychological Association Publication Manual (6th ed., 2010).

Footnotes are not accepted. Those strictly necessary should be consecutively numbered using Arabic numbers and added at the end of the work in a separated page.

The authors must ensure that the text does not contain suggestions that identify them.

2. Information of authors

A separate file should contain the following information: institutional affiliation of each author; sources of economic support; contact details for readers. This file will be uploaded as a complementary file.

Use the following format for institutional affiliation information: name of the first author, name of the institution; name of the second author, name of the institution; and so on until the end of all authors of the paper. The academic degrees of the authors should not

be indicated. If the authors were not affiliated to any institution when the work was conducted, please provide information on the city, state and country (it is preferable not to use abbreviations to name countries). If institutional affiliation changed during the writing of the MS (in relation to the affiliation where the research was done), please indicate in the second paragraph (i.e., "Author" is now in "name of the new affiliation", without quotes). This file should also include acknowledgements.

3. Sections of the manuscript

The first page should include the title, abstract and keywords both in English and Spanish. The abstract should not exceed 150 words. Four keywords separated by semicolons should be included, which should be representative of the manuscript to facilitate the indexing of the paper in databases.

Original articles and short communications should include the following sections after the initial page: introduction, method (design, participants, instruments, procedure, data analysis), results, discussion, and references. Theoretical or methodological reviews can have ad-hoc sections, be defined by authors, including references at the end.

Figures and tables should be included on separated pages and they should be presented in white and black. Tables should be prepared in the final format that they will appear in the paper, and they should be consecutively numbered in the order mentioned in the text. If images are sent as separate files, the TIFF format will be preferred, at a resolution of 1200 dpi. Images created with Microsoft Office (i.e., Excel, Power Point) will be accepted. Each figure and table should include a clear legend.

4. Review and editing processes

Manuscripts submitted to the AJBS are sent to experts to their evaluation. This process is double-blind. The decision to accept, revise or reject a paper is made,

based upon the evaluations, by members of the Editorial Staff, who will communicate the decision to the authors.

Once an article is accepted, authors must sign a letter of originality and a letter of author's rights delegation.

5. Citations and references

Citations and references must be done following the norms established in the APA Manual (6th ed., 2010). Include the DOI identification number if available using the following format: doi: xxxxxx/xxxxxxx.