



**HAL**  
open science

# Étude des effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur sur le développement cognitif et les apprentissages scolaires chez l'enfant : étude comportementale et en IRM

Lisa Delalande

## ► To cite this version:

Lisa Delalande. Étude des effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur sur le développement cognitif et les apprentissages scolaires chez l'enfant : étude comportementale et en IRM. Psychologie. Université Sorbonne Paris Cité, 2018. Français. NNT : 2018USPCB241 . tel-02519779v1

**HAL Id: tel-02519779**

**<https://theses.hal.science/tel-02519779v1>**

Submitted on 26 Mar 2020 (v1), last revised 7 Apr 2020 (v2)

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

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



USPC  
Université Sorbonne  
Paris Cité



LaPsyDÉ



*Université Paris Descartes*

*École Doctorale 261 : « Cognition, Comportements, Conduites Humaines »*

*Laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (LaPsyDÉ),  
UMR CNRS 8240*

## **Étude des effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur sur le développement cognitif et les apprentissages scolaires chez l'enfant : étude comportementale et en IRM.**

Lisa DELALANDE

Thèse de doctorat en Psychologie, Mention Neurosciences cognitives

Dirigée par le Pr. Grégoire BORST  
et co-dirigée par le Dr. Gregory SIMON

Présentée et soutenue publiquement le 27 novembre 2018

Devant un jury composé de :

BORST, Grégoire, Professeur à l'Université Paris Descartes – Directeur de thèse  
BOUQUET, Cédric, Professeur à l'Université Poitiers – Examineur  
GUILLERY-GIRARD, Bérengère, Maître de conférence HDR – Rapporteur  
GUILLOIS, BERNARD, PU-PH à l'Université Caen Normandie – Rapporteur  
POIREL, Nicolas, Professeur à l'Université Paris Descartes – Examineur  
SIMON, Gregory, Maître de conférence HDR – Co-directeur de thèse



# REMERCIEMENTS

Mes remerciements sont tout d'abord adressés aux membres de ce jury, Bérengère GUILLERY-GIRARD, Bernard GUILLOIS, Cédric BOUQUET et Nicolas POIREL, qui me font l'honneur d'avoir accepté de faire partie de ce jury, ainsi que d'être présents lors de ma soutenance. Je les remercie également pour l'apport de leur expertise et pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce travail.

Ensuite, je souhaite remercier les équipes du rectorat ainsi que la direction diocésaine, qui nous ont permis de recruter des enfants volontaires dans les établissements scolaires aux alentours de la ville de Caen. Je souhaite également remercier, tous les directeurs et directrices d'établissements ainsi que les équipes pédagogiques qui ont accepté de participer à ce projet. Grâce à ce soutien, nous avons pu réaliser cette étape cruciale de recrutement dans des conditions optimales.

Je souhaite remercier Olivier HOUDÉ pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire de recherche. Je souhaite également remercier mon directeur de thèse Grégoire BORST pour son encadrement.

Je souhaite remercier tous les autres membres du laboratoire pour leur accueil, et en particulier ceux avec qui j'ai travaillé dans le cadre du projet APEX, Arnaud C., Julie et Émilie, ainsi que Arlette pour son extrême bienveillance.

Encore plus particulièrement, je souhaite remercier Claire pour sa précieuse aide face à l'Everest que sont les démarches administratives, mais par-dessus tout merci pour ta gentillesse. Je souhaite remercier Nicolas pour toutes les fois où tu as répondu présent dans mes moments difficiles, tu as été une oreille attentive donc sincèrement merci. Merci aussi à François, herr doktor, pour les mercredis, les discussions en tout genre et plus ou moins sérieuses, ton rire très communicateur, les fous rires qui vont avec et pour la facilité que tu as à transmettre très humblement tes connaissances.

Je souhaite grandement remercier mon deuxième, et non des moindres, *partner in crime* du mercredi Jean-Marc. Merci pour ta gentillesse, ton humour, nos discussions sur les triathlons, pour toutes les

fois où on a fait des plans parce que : "tu vois c'est à la carre d'en bas de la rue du bout de la ville d'en face du port".

Grâce à François et à toi je garderai un souvenir très chaleureux de ces moments passés avec vous : la compétition des mots croisés et/ou fléchés, et encore et surtout les rigolades. Un grand merci aussi pour m'avoir supportée le matin, mal ou pas encore réveillée (sachant que ce n'est vraiment pas donné à tout le monde !).

Je souhaite remercier aussi Marie-Christine et Christelle avec qui j'ai eu la chance de travailler, merci pour votre douceur. Merci également à Céline, qui a vite compris mon addiction au sucre et qui a su l'assouvir, et merci à Ahmed pour ses conseils sur les revers au tennis et son humour.

Je souhaite aussi remercier tous les doctorants du laboratoire, les anciens comme les nouveaux, Adriano, Anaëlle, Bence, Cloélia (grande sœur APEX), Darren, Joy (l'atout ragots ou le point gazette), Manali, Margot (j'espère un jour faire des salades aussi belles que les tiennes), Marie, Matthieu, Stéphanie et Valérie (ne laisse pas les tablettes sentir que tu as peur, elles s'en serviront contre toi !). Je remercie particulièrement Lison, tu as été un véritable soutien et toujours présente pour me remonter le moral ou me faire relativiser, donc un grand merci.

Je souhaite également remercier mon très chère binôme Marine. Merci pour tout, les hauts comme les quelques bas. Comme le chante la grande Edith, "non rien de rien, non je ne regrette rien". Je retiens que le bon : ton grand cœur, les fous rires, Sia, Vianney, les cygnes, les macdos, le buffet à volonté pas très chinois, le pré en ville, les cafés, le thé, les oreos, les galères SNCF, etc. Tu as été un véritable soutien et sur tous les fronts, donc tout simplement mais très sincèrement merci ! Pour rien au monde je ne changerais la personne (on est d'accord, cette personne c'est toi !) qui a été à mes côtés et avec qui j'ai passé toutes ces années très particulières de thèse, elles n'auraient clairement pas eu la même saveur.

Un très grand merci à tous les enfants et les familles qui ont acceptés de participer au projet APEX. C'était un véritable plaisir de vous avoir comme volontaires. Je remercie les enfants pour leur grand sérieux, ils avaient tous à cœur de nous aider et ils avaient une grande envie d'ajouter leur pierre à l'édifice. Ils m'ont tous touchée et épatée par leur maturité. Sans eux, ce travail de thèse n'aurait jamais pu être réalisé, et en plus de cela, ils l'ont rendu tout à fait agréable.

Maintenant, d'un point de vue personnel et donc beaucoup moins formel, je tiens à remercier mes proches. Je profite de cette occasion pour coucher sur le papier (et je vais essayer de trouver les bons mots) l'immense importance que vous avez dans ma vie. Je pourrais écrire (à nouveau !) toute une thèse sur l'amour que je vous porte.

Très honnêtement (et vous le savez), cette période de thèse n'a absolument pas été un long fleuve tranquille. Je ne vous remercierai jamais assez de m'avoir soutenue, tous d'un bloc. Merci aussi pour m'avoir réconfortée en m'écoutant tout simplement ou à l'aide de mots doux, de bières, de câlins, de visites surprises, de bières, de danses, de fous rires, de Disney, de bons gueuletons, de bons moments passés ensemble, de soirées, de bières, etc.

Très honnêtement encore, j'ai pratiquement plus fait cette thèse pour vous que pour moi.

Donc j'espère qu'elle vous plaira. Non je plaisante, je sais parfaitement que la plupart d'entre vous ne la liront jamais ! Et j'en suis d'autant plus touchée, parce que vous me soutenez inconditionnellement sans même vraiment savoir de quoi ça parle.

Je tiens à remercier mes très chers Maudits, qui sont indéniablement les premiers responsables de ma folie. King Maudit I<sup>er</sup> merci pour tout. Je ne sais pas comment tu fais, mais en deux trois mots ou parfois juste avec une mimique, tu me fais aller mieux si ça ne va pas et encore mieux si ça allait déjà. Pour toutes tes qualités et pour tous tes défauts, tu es à mes yeux (et de très loin) le meilleur des souverains qui existe. Merci aussi à toi Chloey. On n'était clairement pas partie du bon pied toutes les deux, mais désormais je suis la Maudite la plus comblée du monde. Merci d'être parfois une béquille pour moi, voire un bouclier. Lou merci d'être toujours beaucoup plus fière de moi que moi, et peu importe mes choix (j'espère que la tempête passera). Merci aussi à Mady de se tracasser à ma place, je sais que c'est comme ça que tu aimes.

Un très grand merci aussi aux Lutins : Maudit II<sup>ème</sup>, Queen Maudite et Petite Montagne. Un grand merci également aux Gros : Maudit III<sup>ème</sup> et le Gros. Merci d'être comme vous êtes, c'est-à-dire Maudit jusqu'à la moelle.

Je voudrais remercier les deuxièmes responsables de ma folie, ceux qui la supportent avec brio mais surtout qui l'amplifient et l'embellissent, mes très chers amis/acolytes/alliés/poteaux et tout dernièrement supporters. J'ai eu la chance de vous rencontrer tôt dans ma vie, par conséquent nous avons pu grandir ensemble et créer des liens très forts, donc un très grand merci d'être présents dans ma vie depuis si longtemps (dans la joie et la tristesse, la santé et la maladie, etc.). J'aimerais chaudement vous remercier, parce que grâce à vous j'ai trouvé ma place. Quand je suis avec vous, je me sens extraordinairement bien à tel point que j'ai l'impression que les planètes sont en parfait alignement... Et pour moi, c'est la plus fantastique, voire addictive, des sensations ! Vous comptez tous énormément pour moi et pour cela, je dis merci à la vie, je lui dis merci, je chante la vie, je danse la vie... Nous ne sommes qu'amour ! Et j'ai hâte de voir ce que l'avenir nous réserve.

Merci à Néna, mon ying (ou mon yang, je te laisse choisir). Ta très récente sérénité (sûrement due à tu sais qui !), m'a véritablement sauvée pendant mes grands moments de doutes. Merci aussi pour tous ces meilleurs souvenirs et pour les prochains. BONZAÏ !!!

Merci à Camillo. Depuis toutes ces années, tu m'as appris deux choses : porter en permanence un maillot de bain, et toujours avoir une bush de secours. Tu le sais, sur les deux j'en applique surtout une, mais qui sait d'ici dix autres années, je finirai peut-être par y arriver. Regarde j'aime la noix de coco maintenant !

Merci à Maïe. Pour, l'extrême, courage, dont, tu, as, fait, preuve, en, venant, dans, ma, grotte, pendant, la, période, (très), critique, de, la, rédaction, de, cette, thèse. Milles, merci, pour, ton, aide, précieuse. Sans toi, j'aurais, très, certainement, basculer, du, côté, obscur. Ça, mérite, une, petite, chanson : "Marie, I lov...".

Encore merci à vous deux, pour tout, vous êtes mes piliers. Merci pour les rires, les fous rires, les supers fous rires, etc. Nous allons marcher (pour encore) très longtemps et éhontément main dans la main ! C'est vous et moi, moi et vous, plat du jour et dessert !!

Merci à Héloïse. Toi aussi tu as été un de mes piliers pendant ces trois dernières années, et je préfère te prévenir c'est totalement irréversible, alors prépare toi à m'avoir sur le dos pour le restant de tes jours ! Merci de m'avoir écouté tant de fois me plaindre. Merci aussi de m'aider à gérer mon "*problème*". Je te remercie pour tous les moments que nous avons passés ensemble (chèvre/bières/Bellamy), et il y en aura d'autres ! D'ailleurs nous devons rattraper notre retard !

Merci à Minou. Pour tes messages d'encouragements, merci de m'avoir aidée à me vider la tête les jeudis soir. Tu ne me croiras sûrement pas mais le squash me manque !

Merci à Christine, pour m'avoir fait découvrir le chou farci et d'être aussi épatante.

Merci à Jerem', le diamant d'innocence.

Merci à Gohu, qui me fait tant rigoler.

Merci à Fred. Ça y est je quitte Poudlard !

Merci à Chloé, à Valou et à Laura, hôtes parisiens d'exception. Merci d'avoir fait de ces moments parisiens des moments agréables.

Merci aussi à Aurel' (j'aurais dû t'écouter), à Stef' (pour m'avoir fait rencontrer Gathou), à Carole, à Juju, à Benjam', à Gwen, à Laura et à Elisa.

J'ai tellement hâte de vous retrouver.

*"Le monde est dangereux !*

*Non pas tant à cause de ceux qui font le mal,*

*mais à cause de ceux qui regardent et laissent faire."*

Albert Einstein



# TABLES DES MATIÈRES

<b>AVANT-PROPOS</b> .....	1
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	5
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>Le contrôle inhibiteur : composante centrale des fonctions exécutives</b> .....	5
I. Définitions des fonctions exécutives .....	5
II. Les bases neurales des fonctions exécutives .....	11
III. Trajectoire développementales comportementales .....	15
IV. Trajectoires développementales cérébrales.....	18
V. Facteurs cérébraux influençant l'efficacité des fonctions exécutives .....	24
VI. Conclusion.....	27
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>Le rôle des fonctions exécutives dans le développement cognitif</b> .....	28
I. Les modèles du développement cognitif .....	28
a. Modèle Piagétien .....	28
b. Modèle néo-piagétien .....	33
c. Système noyaux et neuroconstructivisme .....	35
d. L'inhibition : un nouveau modèle théorique .....	38
II. Efficacité du contrôle inhibiteur et apprentissages scolaires .....	43
III. Conclusion.....	48
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>Entraînements des fonctions exécutives</b> .....	49
I. Travaux précurseurs des effets de l'entraînement.....	49
II. Les effets de transfert dans les études de l'entraînement des fonctions exécutives ....	53
III. Définition et utilité des études de l'entraînement cognitif .....	60
a. Deux types de paradigmes d'entraînement cognitif.....	61

b. Les différences individuelles dans les bénéfices de l'entraînement.....	64
IV. Études des effets de l'entraînement des fonctions exécutives .....	66
V. Conclusion.....	70
<b>OBJECTIFS DE LA THÈSE .....</b>	<b>72</b>
<b>PROTOCOLE APEX .....</b>	<b>73</b>
I. Recrutement .....	74
II. L'examen IRM.....	76
a. Visite d'inclusion et préparation à la passation IRM.....	78
b. IRM anatomique.....	79
i. Acquisitions des données anatomiques.....	79
ii. Pré-traitements des données anatomiques.....	80
iii. Analyses des données anatomiques.....	82
c. IRM fonctionnelle au repos.....	82
d. IRM fonctionnelle d'activation.....	83
e. IRM de diffusion .....	84
III. Évaluations cognitives.....	84
IV. Entraînements sur tablette tactile.....	85
a. Le groupe contrôle actif .....	86
b. Le groupe contrôle inhibiteur .....	86
<b>ÉTUDES EXPÉRIMENTALES</b>	
<b>Étude n°1 : Étude des effets de transferts induits par un entraînement intensif au contrôle inhibiteur chez des enfants d'âge scolaire.....</b>	<b>88</b>
I. Introduction .....	88
II. Matériels et méthodes.....	90
III. Résultats.....	96
IV. Discussion.....	101
<b>Étude n°2 : Étude des effets de la progression et de la motivation sur les effets de transfert induits par un entraînement intensif au contrôle inhibiteur chez des enfants d'âge scolaire .....</b>	<b>106</b>
I. Introduction .....	106
II. Matériels et méthodes.....	107
III. Résultats.....	108
IV. Discussion.....	112

<b>Étude n°3 : Modifications structurales complexes du cortex préfrontal induites par entraînement au contrôle inhibiteur de l'enfance à l'adolescence</b> .....	116
I. Introduction .....	116
II. Méthode.....	119
III. Résultats.....	126
IV. Discussion.....	131
V. Conclusion.....	134
<b>DISCUSSION GÉNÉRALE</b> .....	135
I. Synthèse des résultats .....	135
II. Critiques des analyses statistiques .....	137
III. Biais liés aux contraintes du protocole .....	138
IV. Critiques et améliorations des entraînements .....	139
a. Adaptation des entraînements .....	139
b. Motivation et effets placebo.....	140
c. Le futur des entraînements cognitifs : les jeux vidéo .....	141
V. Futures analyses.....	142
a. Analyses sur le reste de la batterie de tests cognitifs.....	142
b. Analyses des données des entraînements sur tablette .....	143
c. Analyses du reste des données IRM.....	143
d. Analyses avec un groupe d'adolescents.....	143
e. Mise en place d'un posttest différé .....	144
VI. Vers l'éducation .....	144
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	147
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	149
<b>ANNEXES</b> .....	185



# AVANT-PROPOS

*Qu'est-ce que les fonctions exécutives ?*

*À quoi servent-elles ?*

*Et pourquoi sont-elles largement étudiées ?*

Pour répondre à ces questions, prenons un exemple de la vie quotidienne relativement simple : faire les courses. En effet, faire les courses met en jeu pratiquement l'intégralité des fonctions exécutives. En voici quelques étapes : dans un premier temps, il s'agit de faire une liste des produits à acheter. Selon les besoins, cette liste peut être exhaustive ou non. Certaines personnes, par exemple, font cette liste en fonction de l'ordre des rayons du supermarché, d'autres encore la font par catégories des produits à acheter (i.e. fruits et légumes, produits laitiers, etc.), tout en respectant un budget ou non. Il existe une multitude de stratégies pour réaliser cette liste : certains individus combinent les deux stratégies données en exemple, certains vont en utiliser d'autres et certains ne vont pas du tout utiliser de stratégies. Dans un deuxième temps, une fois cette action planifiée, il faut l'organiser : en décidant quand, où et avec quel moyen on ira faire les courses. C'est-à-dire qu'il est nécessaire de choisir les meilleures options pour être rapide et efficace, comme par exemple, ne pas y aller un samedi après-midi ou choisir la caisse avec la file d'attente la moins longue. Une fois en magasin, il s'agit de faire attention aux dates de péremption et aux prix, plus particulièrement aux prix au kilogramme (qui est beaucoup moins visible). Mais il faut aussi prêter attention aux éventuelles promotions, donc il faut se montrer flexible en changeant éventuellement certains produits pour d'autres plus avantageux en prix et/ou en quantité et/ou en qualité. Pour continuer, il faut éviter de se faire piéger par les produits phare, comme un grand nombre de choix de glaces pendant l'été. Il faut résister aux tentations,

comme les pâtisseries ou les tablettes de chocolat. Il faut également anticiper les besoins, comme prévoir un sandwich pour un midi dans la semaine ou les ingrédients nécessaires à la réalisation d'un dîner entre amis. Voici en résumé, à mes yeux, les étapes clefs pour effectuer ses courses efficacement. Mais bien-sûr, elles ne le sont peut-être pas à vos yeux. En effet, peut-être que certains d'entre vous n'ont même pas besoin de faire de liste (étape cruciale pour ma part) ou alors que certains adorent tout particulièrement faire les courses (ce qui n'est absolument pas mon cas) et donc s'organisent totalement différemment.

Faire les courses est donc une activité qui semble facile, mais qui ne l'est pas forcément pour tous. Cet exemple décrit parfaitement l'aspect à la fois simple et complexe qui caractérise les fonctions exécutives. Dans cette illustration il faut anticiper, planifier, initier une action, être attentif, être flexible, inhiber les tentations, etc. C'est-à-dire que le large éventail des fonctions exécutives est recruté. Nous pouvons reprendre le terme, inventé par le professeur Alain Berthoz, qui englobe ces deux aspects : faire les courses démontre la 'simplicité' des fonctions exécutives (A. Berthoz, La simplicité, Paris, Ed. Odile Jacob, 2009). Il définit la 'simplicité' comme un ensemble de solutions simplificatrices qui ont été créées par l'organisme vivant en réponse au monde complexe environnant. Celles-ci permettent de traiter les informations avec plus de facilité, en anticipant et en prenant en compte l'expérience. Tout ceci serait impossible sans les fonctions exécutives. Une autre illustration, mise en avant grâce à cet exemple, est la grande variabilité intra et interindividuelle : pour une même tâche il y a des différences entre les personnes, mais également pour un même individu en fonction de la motivation par exemple. En effet, le fait de concevoir les courses comme une corvée ou au contraire comme une activité agréable influence directement l'implication et l'efficacité dans la tâche. Dans un tout autre registre, c'est face à cette 'simplicité' et à cette diversité dans les fonctions exécutives que les professeurs des écoles travaillent quotidiennement, du fait qu'elles sont directement impliquées dans les apprentissages scolaires. Si nous demandions à des enfants âgés entre 9 et 10 ans de faire les courses, le résultat serait tout autre. En effet, leurs difficultés à résister aux tentations comme prendre des glaces ou des bonbons, ou encore leur éventuelle incapacité à organiser cette tâche de manière cohérente et efficace, est en partie dues à leur manque d'expérience mais surtout au

fait que leurs fonctions exécutives sont en plein développement. Découvrir comment elles fonctionnent, comment elles se développent et pourquoi il existe autant de différences intra et interindividuelles relève d'un véritable enjeu du point de vue de la pédagogie. Ces découvertes permettraient de prescrire des interventions pédagogiques adaptées pour parer aux difficultés des enfants à l'école, et donc venir en aide aux professeurs.

Nous allons au cours de ce manuscrit vous décrire dans une première partie, de manière plus scientifique, les fonctions exécutives. Nous allons vous présenter les trois principales composantes exécutives ainsi que leurs définitions, tout en nous centrant sur le contrôle inhibiteur. Ensuite, nous vous décrirons les bases neurales et les trajectoires développementales comportementales ainsi que cérébrales. Pour terminer, nous étudierons les facteurs cérébraux qui influencent l'efficacité du contrôle inhibiteur. Dans une deuxième partie, nous aborderons le rôle des fonctions exécutives dans le développement cognitif chez l'enfant, en vous présentant les différents modèles théoriques, ainsi que leur évolution jusqu'à aujourd'hui. Enfin, dans une troisième partie nous discuterons de l'entraînement et de l'apprentissage des fonctions exécutives, en vous exposant les effets et l'utilité de l'étude des effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur.



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## CHAPITRE I :

### **Le contrôle inhibiteur : composante centrale des fonctions exécutives**

---

#### **I. Définitions des fonctions exécutives**

Quotidiennement, nous devons sélectionner une action spécifique parmi de nombreux choix possibles, tout en nous adaptant de manière flexible à notre environnement qui évolue constamment (Karchach et al., 2017). Ces processus mis en jeu ici sont des processus cognitifs de haut niveau appelés les fonctions exécutives (Miyake et al., 2000). Ces fonctions sont associées à de nombreux mécanismes, mais les principaux sont : l'anticipation, la sélection d'un but, la planification, l'initiation d'activité, la régulation émotionnelle, la flexibilité mentale et les ressources attentionnelles (Anderson, 2002). Ces processus exécutifs se développent pendant l'enfance jusqu'à l'âge adulte en passant par l'adolescence (Blakemore & Robbins, 2012; Casey & Caudle, 2013; Shulman et al., 2016). Ils sont impliqués dans le fonctionnement cognitif, le contrôle comportemental et les interactions sociales. Ils jouent également un rôle de prédicteur dans la réussite scolaire et professionnelle (Dennis, 1989; Blair & Razza, 2007; Carlson & Moses, 2013; Kim et al., 2013) mais aussi dans la santé mentale et physique, ou encore dans la richesse et la qualité de vie (Moffitt et al., 2011; Reinert et al., 2013; Bull & Lee, 2014; Cragg & Gilmore, 2014; Liang et al., 2014). De par leur grande importance dans de nombreux domaines très diversifiés, les fonctions exécutives ont été largement étudiées et plus particulièrement depuis ces dernières

années grâce à l'émergence des techniques d'imagerie cérébrale non invasives, telles que l'imagerie par résonance magnétique (i.e. l'IRM).

Dans la littérature, il existe trois principales composantes exécutives (Houdé, 2000; Miyake et al., 2000; Davidson et al., 2006; Diamond et al., 2007; Diamond, 2013; Diamond & Ling, 2016) qui dirigent ou supervisent les processus de bas niveau (Miller & Cohen, 2001). Ces dernières sont le contrôle inhibiteur, la mémoire de travail et la flexibilité cognitive.

La flexibilité cognitive est la capacité de basculer ou d'alterner entre plusieurs règles mentales, comme par exemple classier des objets en alternant entre la forme et la couleur (Sanne et al., 2013). Elle permet de basculer mentalement entre deux règles de manière fluide en se désengageant de la première pour appliquer la deuxième et vice versa (Diamond, 2013; Karbach & Unger, 2014). Cette capacité peut être mesurée à l'aide du *Trail Making Test* (TMT) qui permet d'obtenir un score de flexibilité correspondant à la différence en secondes entre le temps nécessaire pour réaliser la tâche avec une seule règle à respecter et l'alternance entre deux règles distinctes.

La mémoire de travail permet de maintenir en mémoire et de manipuler des informations pertinentes (Sanne et al., 2013). Elle rend possible la mise à jour des informations : remplacer les anciennes informations par des nouvelles davantage pertinentes (Karbach & Unger, 2014). L'une des tâches les plus connues pour mesurer cette compétence est le test d'empan envers pour lequel on demande aux participants de restituer une série de chiffres dans l'ordre inverse.

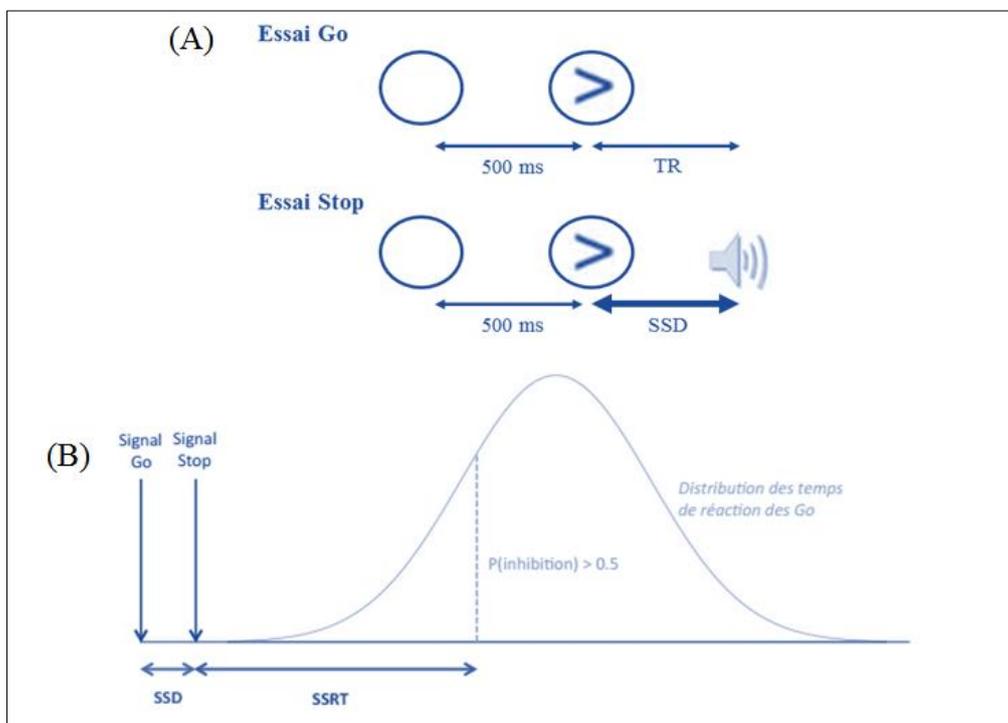
Enfin, le contrôle inhibiteur est la capacité de supprimer une réponse dominante en faveur d'une autre réponse plus pertinente ou en faveur d'aucune réponse (Sanne et al., 2013). Le contrôle inhibiteur est impliqué dans le contrôle de l'attention, des comportements, des pensées et des émotions, tout en supprimant les distracteurs internes ou externes, pour faire ce qui est le plus approprié ou nécessaire (Diamond, 2013). Il existe de nombreuses tâches standardisées qui permettent d'évaluer les capacités inhibitrices des participants.

L'une des plus connues et des plus utilisées est la tâche de Stroop, créée par John Ridley Stroop en 1935. Pour réaliser cette tâche, les participants doivent lire à haute voix trois différentes

planches aussi vite que possible (cf. annexe 1). Deux d'entre elles sont des planches contrôle, appelées également les planches congruentes (cf. Carte A et C de l'annexe 1). Pour la première, il est demandé de lire des mots écrits en noir, (e.g. **BLEU**), pour la deuxième, il s'agit de dénommer la couleur des rectangles (e.g. ) en lisant la feuille de gauche à droite et toujours le plus rapidement possible et sans faire d'erreurs. Dans la troisième et dernière planche, il faut dénommer la couleur de l'encre avec laquelle le mot est écrit, et ne pas lire les mots (cf. carte B de l'annexe 1). Contrairement aux autres feuilles, celle-ci contient uniquement des items incongruents. En effet, le mot écrit et la couleur de l'encre sont différents (e.g. **BLEU**). Dans cet exemple, le participant ne doit pas lire le mot mais donner la couleur de l'encre, donc ici répondre 'rouge'. En d'autres termes, les participants doivent inhiber une tâche extrêmement automatisée (i.e. la lecture de mots) en faveur d'une tâche qui l'est beaucoup moins (i.e. la dénomination de la couleur de l'encre) (Scarpina & Tagini, 2017). Cette difficulté à inhiber le processus le plus mécanique au profit d'un autre est appelée l'effet Stroop (Stroop, 1935) ou l'effet d'interférence.

Une autre tâche permettant de tester l'inhibition est la tâche du go/no-go. Ici, les participants sont face à deux types de stimuli différents : les items go et les items no-go. Par exemple, dans une version destinée aux enfants, ceux-ci doivent cliquer sur le bouton gauche de la souris dès qu'ils voient un Pokémon® apparaître sur l'écran de l'ordinateur (i.e. stimulus go). En revanche, ils ne doivent pas cliquer lorsque c'est Miaouss qui apparaît à l'écran (i.e. stimulus no-go). Les capacités d'inhibition sont utilisées pour bloquer ou stopper l'action motrice dès que le Pokémon® Miaouss est reconnu parmi les nombreux autres. Dans le même esprit, il existe la tâche de Stop-Signal (i.e. *Stop-Signal Task* ou SST en anglais) (Lappin & Eriksen, 1966; Logan & Cowan, 1984; Verbuggen et al., 2008) (cf. Figure 1). Le paradigme de cette tâche contient des stimuli go (qui représentent 75 % des essais) et des stimuli stop (qui représentent les 25 % des essais restant) (Aron & Poldrack, 2006). La consigne pour les stimuli go est la suivante : à chaque essai, des flèches pointant soit vers la droite soit vers la gauche vont apparaître sur l'écran de l'ordinateur. Les participants doivent alors cliquer à droite si la flèche pointe à droite ou à gauche si elle pointe à gauche, et cela le plus rapidement possible et sans faire d'erreurs. Cependant, à la suite de l'apparition du stimulus stop, c'est-à-dire lors d'un bip sonore, les participants doivent bloquer

leur réponse. En d'autres termes, si un bip apparaît à la suite d'une flèche, le participant ne doit rien répondre et donc ne plus se préoccuper du sens de la flèche. Le temps qui s'écoule entre l'apparition du stimulus go et celui du stimulus stop est appelé le *Stop-Signal Detection* ou le *Stop-Signal Delay* (SSD) en anglais. Il se mesure en millisecondes et se présente toujours après le stimulus go. La tâche est construite de telle manière que si un signal stop est correctement inhibé (i.e. pas de réponse du participant), le SSD augmentera de 50 ms au signal stop suivant et inversement le SSD diminuera s'il n'est pas réussi (i.e. réponse du participant). Ceci accentue la difficulté puisque, plus l'écart (en millisecondes) entre le stimulus go et le signal stop est grand, plus il est difficile (voire impossible) de stopper l'action motrice déjà engagée. L'indice le plus pertinent à calculer pour cette tâche est appelé en anglais le *Stop-Signal Reaction Time* (SSRT) (Band et al., 2003). Le SSRT se calcule en soustrayant la moyenne des SSD à la médiane des temps de réponse des stimuli go réussis (Aron & Poldcrack, 2006).



**Figure 1 :** (A) Paradigme de la tâche de stop-signal, (B) Estimation de l'indice SSRT (Figures adaptées de Aron & Poldcrack, 2006).

Il existe une distinction entre deux aspects du contrôle inhibiteur : l'inhibition froide et l'inhibition chaude (Zelazo & Müller, 2002; Zelazo & Carlson, 2012). L'inhibition froide est utilisée uniquement pour résoudre des problèmes abstraits ou décontextualisés alors que l'inhibition chaude implique la régulation des émotions et de la motivation. Par exemple, au niveau comportemental, le *Wisconsin Card Sorting Test* (i.e. WCST) (Grant & Berg, 1948) permet de tester les capacités d'inhibition froide. Pour cette tâche, les participants (enfants comme adultes) doivent classer des cartes de jeu qui leur sont présentées selon une règle (e.g. couleur, forme ou nombre) qui leur est inconnue et surtout, celle-ci va changer sans qu'ils ne le sachent ni que ce ne soit dit explicitement par l'expérimentateur. Les participants doivent donc trouver la nouvelle règle de classement des cartes mais ils doivent également réussir à se désengager de la règle précédente, c'est-à-dire l'inhiber. Concernant l'inhibition chaude, la tâche de gratification différée ou *Delay Discounting Task* en anglais (i.e. DDT) permet d'en mesurer les capacités. Ici les participants doivent par exemple choisir entre une petite récompense immédiate et une récompense plus importante différée (i.e. choix prudent). Les participants doivent inhiber la tentation d'avoir (fictivement) plus de récompenses tout de suite et doivent se résoudre à attendre dans le but d'augmenter leurs gains. Les participants doivent donc inhiber 'l'appât du gain' et ici la dimension émotionnelle de la tâche est justement apportée par l'argent.

La question que l'on peut se poser maintenant est : *comment les fonctions exécutives fonctionnent-elles entre elles ?* Les trois composantes principales sont des processus exécutifs distincts qui utilisent des ressources cognitives communes (Sanne et al., 2013). Il est très difficile de les tester de manière isolée ou de manière 'pure' (Miyake et al., 2000). Elles travaillent donc conjointement. La flexibilité cognitive est un pivot ou un pilier entre le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail. En d'autres termes, elle s'appuie sur ces deux autres composantes (Diamond, 2013). De la même manière, le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail se supportent réciproquement et il est rare que l'un des deux processus soit utilisé sans l'autre (Diamond, 2013).

Cependant, cette vision n'est pas entièrement validée par l'ensemble des chercheurs. De multiples études ont soulevé des résultats différents et contradictoires avec, soit un système exécutif unitaire, soit avec un système exécutif comprenant plusieurs composants indépendants

et également avec des différences (ou non) entre les enfants et les adultes (Lehto et al., 2003; Salthouse et al., 2003; Wiebe et al., 2008; Willoughby et al., 2010; Rose et al., 2011; Wu et al., 2011). Une des possibles explications face à ces désaccords est que, d'un point de vue développemental, la structure des processus exécutifs est au départ unitaire pour ensuite se différencier pendant l'enfance (Wiebe et al., 2011). Cependant cette explication n'est pas suffisante. Une autre partie de ces divergences dans les résultats peut être due au choix dans les matériels et méthodes utilisés (e.g. le choix des tests cognitifs, la cotation, etc.) (Miyake et al., 2000). Par exemple, pour les études faites chez les enfants, les scores utilisés sont le nombre de bonnes réponses (Willoughby et al., 2010; Fuhs & Day, 2011) alors que pour les études chez les adolescents et les adultes le temps de réponse des participants est ajouté aux scores (Miyake et al., 2000; Lehto et al., 2003).

Pourtant, il semble apparaître un début d'entente sur le fait que la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur sont les deux fonctions exécutives principales et motrices dans la mise en place des apprentissages et dans les performances exécutives. Ils représentent donc deux composants clefs à étudier pendant le développement. Mais les discussions persistent pour savoir laquelle des deux occupe une place fondamentale. Certains auteurs considèrent les performances de mémoire de travail comme étant le reflet des capacités intellectuelles (Miyake et al., 2001). À l'opposé, certains placent le contrôle inhibiteur au cœur de leur théorie.

Juan Pascual-Leone est certainement le premier auteur post-piagétien à souligner l'importance de ces deux processus pour comprendre les difficultés et les progrès des enfants associés directement au développement cérébral (et plus précisément celui du cortex préfrontal) (Pascual-Leone, 1987). Cependant, il existe un désaccord dans la littérature concernant la place du contrôle inhibiteur au sein même des fonctions exécutives. Certains auteurs considèrent ce processus comme une composante centrale (Harnishfeger & Bjorklund, 1994; Zacks & Hasher, 1994; Barkley, 1997; Dempster & Corkill, 1999) alors que d'autres ne considèrent même pas le contrôle inhibiteur comme une composante indépendante mais comme faisant partie des fonctions exécutives (Friedman et al., 2008; Alderson et al., 2010; Miyake & Friedman, 2012). En d'autres termes, pour les premiers auteurs le contrôle inhibiteur tiendrait une place

fondamentale, indispensable et unificatrice au sein des fonctions exécutives alors que les détracteurs considèrent qu'une composante exclusivement inhibitrice n'existe pas. Pour eux, le contrôle inhibiteur ne serait pas séparable du système exécutif commun. Dans ce cas seulement, la flexibilité cognitive et la mémoire de travail auraient des facteurs propres et distincts. Par conséquent, il serait possible de mesurer et de tester les performances de flexibilité cognitive et de mémoire de travail, chose impossible concernant celles du contrôle inhibiteur. Cependant, d'autres chercheurs modèrent ces oppositions en utilisant un modèle alternatif considérant qu'une composante purement inhibitrice existerait avec, en même temps, l'existence d'un système général unificateur (Duncan et al., 1997).

Le propos de cette thèse étant l'entraînement intensif au contrôle inhibiteur, nous nous plaçons aux côtés des chercheurs qui mettent cette composante exécutive au cœur de leurs modèles théoriques (Diamond et al., 2007; Diamond & Lee, 2011; Houdé, 2000, 2007 & 2011; Borst et al., 2012, 2013; Borst, Moutier & Houdé, 2013; Houdé & Borst, 2015).

## **II. Les bases neurales des fonctions exécutives**

Au sein de cette partie, nous allons aborder les bases neurales des fonctions exécutives. Du fait que la flexibilité cognitive, la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur sont rarement utilisés de manière isolée, le réseau neuronal est diffus (Diamond, 2013). L'organisation cérébrale suit une certaine hiérarchie, avec comme superviseur le cortex préfrontal et comme employés les autres régions corticales et sous-corticales (Norman & Shallice, 1986; Heyder et al., 2004; Gruber et al., 2006). Certaines méta-analyses ont démontré l'existence d'un réseau fronto-pariétal commun à l'ensemble des fonctions exécutives (Collette et al., 2006; Simmonds et al., 2008; Niendam et al., 2012; Nee & Brown, 2013), mais avec également le recrutement de régions qui leur sont propres. Ce réseau exécutif commun réunit des activations au niveau (a) des régions frontales, notamment le cortex frontal dorsolatéral et le cortex cingulaire antérieur, et (b) au niveau des régions pariétales, notamment le précuneus et le cortex pariétal (inférieur et

supérieur). Par conséquent, certaines régions seraient sollicitées et partagées par le réseau commun, alors que d'autres seraient uniquement employées pour une fonction exécutive spécifique (Luna et al., 2015).

Plus précisément pour le contrôle inhibiteur, de multiples régions sont engagées dans les tâches d'inhibition. La plupart des études se sont centrées sur le réseau neuronal au niveau du cortex préfrontal (Aron, Robbins & Poldrack, 2004 & 2014). Par exemple, certaines études en neuro-imagerie ont montré une activation du cortex préfrontal même pendant la petite enfance (Chugani et al., 1987; Bell & Fox, 1992). En effet, plusieurs chercheurs sont d'accord sur le fait que la fonction principale du cortex préfrontal est celle de contrôle exécutif (Miller & Cohen, 2001). Il existe cependant un désaccord sur la fonction des différentes sous-parties du cortex préfrontal. Certains considèrent que les différentes zones du cortex préfrontal effectuent la même opération mais pour des stimuli sensoriels différents (Goldman-Rakic, 1987; Rushworth et al., 1997). Autrement dit, le cortex préfrontal agirait comme un aiguilleur qui, selon le contexte, dirigerait les informations entrantes aux endroits appropriés (i.e. vers différentes régions cérébrales) (Miller & Cohen, 2001; Aron et al., 2004). Une méta-analyse en neuro-imagerie a démontré une activation bilatérale au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral, du cortex frontal inférieur et du cortex cingulaire antérieur dorsal, indépendamment des tests cognitifs utilisés (Duncan & Owen, 2000). Ceci indique une surprenante spécialisation du cortex préfrontal : un réseau frontal spécifique constamment utilisé pour résoudre différents problèmes cognitifs. Des études réalisées sur des singes atteints de lésions cérébrales au niveau du cortex frontal inférieur droit, ont montré une altération des mesures du contrôle exécutif en perturbant l'inhibition de la réponse (Mishkin, 1964; Iversen & Mishkin, 1970). Une étude réalisée chez des adultes présentant une lésion au niveau du cortex frontal inférieur confirme l'implication de cette région dans les capacités d'inhibition (Demakis, 2003). En utilisant le WCST, les participants avec des dommages frontaux montrent de grandes difficultés à changer de règle, ce qui traduit une persévération de la règle qui doit être modifiée. À l'aide de paradigmes d'inhibition à la réponse, comme les tâches de go/no-go et de stop-signal, une étude en neuro-imagerie a montré une activation cérébrale constante et spécifique du cortex frontal inférieur droit dès que l'inhibition était requise (i.e. items

no-go et stop) (Logan, 1994; pour revue : Aron et al., 2004). Ceci confirme l'implication de cette région cérébrale dans les capacités inhibitrices. Ce résultat est à nouveau retrouvé dans une étude réalisée sur des adultes présentant une lésion au niveau du cortex frontal inférieur droit et ayant passé la tâche de stop-signal, où plus cette région seule est endommagée pire est la réponse inhibitrice (i.e. un SSRT faible/bas) (Aron et al., 2003). Pour conclure, le contrôle inhibiteur peut être localisé dans une sous-région du cortex préfrontal : le cortex frontal inférieur droit (en particulier le pars opercularis) (Aron, Robbins & Poldrack, 2004 & 2014). Dans une étude en IRMf réalisée chez des enfants et utilisant la célèbre tâche de conservation du nombre de Jean Piaget, les chercheurs ont démontré des différences d'activations cérébrales entre les enfants qui réussissent la tâche, appelés les enfants conservants, et les enfants qui ne la réussissent pas, appelés les enfants non-conservants (Houdé et al., 2011). Les enfants conservants recrutent simultanément le cortex pariétal droit, impliqué dans le sens du nombre, et le cortex frontal inférieur droit contrairement aux enfants non-conservants. Ces résultats confirment à nouveau l'implication du cortex frontal dans les processus d'inhibition.

Après s'être focalisées sur le cortex préfrontal, plusieurs études se sont attelées à étudier le réseau neuronal plus diffus des fonctions exécutives. Pour cela, la majorité des études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) utilisent, à nouveau, des paradigmes d'inhibition à la réponse, comme la tâche de stop-signal. Les résultats ont fait ressortir des régions motrices comme l'aire prémotrice supplémentaire (pré-SMA), l'aire motrice supplémentaire (SMA) et le cortex prémoteur (Watanabe et al., 2002; Simmonds et al., 2008; Swick et al., 2011) ainsi que des régions impliquées dans des processus de haut niveau nécessaires pour réaliser la tâche, comme le cortex pariétal, le cortex préfrontal ventrolatéral et le cortex insulaire (Rubia et al., 2001; Verbuggen & Logan, 2008; Luna et al., 2010; Swick et al., 2011; Cieslik et al., 2015; Zhang et al., 2018). Une autre région grandement impliquée dans le contrôle inhibiteur est le gyrus frontal inférieur droit, dont l'implication a beaucoup été retrouvée dans des études en IRMf (Rubia et al., 2003; Aron, 2004 & 2014; Aron, 2007; Levy & Wanger, 2011; Criaud & Boulinguez, 2013). D'autres études encore soulignent l'activation du cortex préfrontal dorsolatéral, du cortex cingulaire antérieur et des régions sous-corticales comme les noyaux sub-thalamiques (Rubia et

al., 2001; Garavan et al., 2006; Verbuggen & Logan, 2008; Criaud & Boulinguez, 2013; Aron, 2016). Le recrutement d'autant de régions cérébrales prouve que le contrôle inhibiteur est associé à un réseau neuronal très diffus et surtout très complexe, avec par exemple certaines régions engagées dans la gestion des interférences (i.e. le cortex insulaire), dans le contrôle attentionnel (i.e. le cortex pariétal), dans la gestion des conflits (i.e. le cortex cingulaire antérieur), dans la réception de la détection du conflit permettant d'inhiber la réponse non-pertinente (i.e. le cortex préfrontal dorsolatéral), etc.

La distinction entre inhibition chaude ou froide (ou *hot or cool* en anglais) a été vérifiée également au niveau cérébral. En effet, l'inhibition froide est associée au cortex préfrontal dorsolatéral, et l'inhibition chaude est associée au cortex orbitofrontal (Metcalf & Mischel, 1999). Plusieurs études en IRM ont confirmé cette différenciation. En effet, certains auteurs ont utilisé un protocole de recherche qui oppose la prise de décision risquée, représentant l'inhibition chaude, à la prise de décision 'ambigüe', représentant l'inhibition froide (Krain et al., 2006). Dans cette méta-analyse, les auteurs ont analysé l'activité cérébrale pendant ces deux types de prises de décisions. La première implique de faibles probabilités d'avoir une récompense forte/élevée et à l'inverse de fortes probabilités d'avoir une récompense faible/peu élevée alors que la deuxième implique le fait d'avoir un résultat avec une probabilité proche du hasard voire inconnue et dont la valeur des récompenses ne varie pas. Les chercheurs ont trouvé une différence significative d'activation dans le cortex orbitofrontal, où l'activation cérébrale est plus importante dans cette région pour les prises de décisions risquées comparées aux ambigües. Ils trouvent également des différences significatives au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral, où l'activation cérébrale est plus importante pour les prises de décisions 'ambigües' comparées aux risquées. Enfin, au niveau du cortex cingulaire antérieur, il y a dans la partie caudale plus d'activité cérébrale pour les 'ambigües' comparées aux risquées, alors que l'inverse est observé dans la partie rostrale (Krain et al., 2006; Huijbregts et al., 2008).

Malgré l'indispensable aide de l'imagerie fonctionnelle, il est nécessaire de prendre du recul sur ces résultats et de garder à l'esprit que ces derniers ont été interprétés selon l'hypothèse de l'inférence inverse. C'est-à-dire que les régions activées pendant une tâche cognitive sont

considérées comme impliquées pleinement dans le processus cognitif, ce qui peut être faux la plupart du temps (Borst & Cachia, 2016).

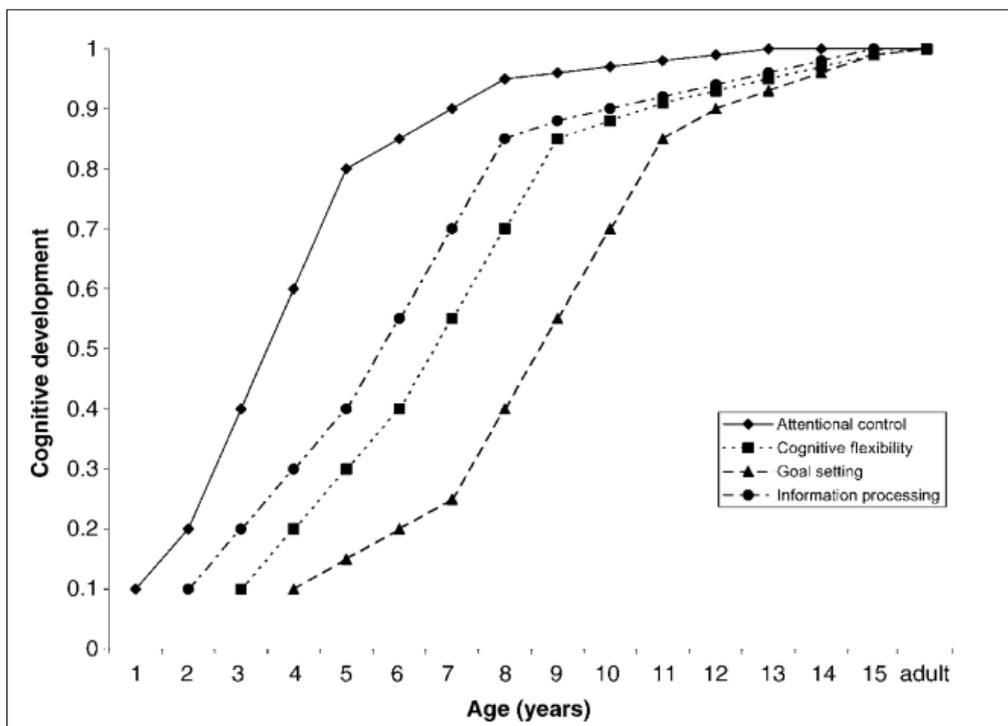
### **III. Trajectoire développementales comportementales**

Comme déjà souligné précédemment, les fonctions exécutives se développent tout au long de l'enfance et jusqu'à l'âge adulte. Il faut également prendre en compte le fait que les capacités du contrôle inhibiteur et de la mémoire de travail existent dès les premiers mois de la vie (Johnson, 1995; Carpenter et al., 1998), tout en se perfectionnant avec l'âge (Velanova et al., 2009; Rubia et al., 2013; Bezdjian et al., 2014; Paulsen et al., 2015). Effectivement, la première année de vie a été identifiée comme étant une étape très importante dans le développement cognitif. C'est à ce moment que les bébés commencent à regarder les adultes et à les utiliser comme point de référence sociale, mais également qu'ils commencent à agir sur les objets en imitant les adultes. En effet, dans une étude réalisée chez des nouveaux nés âgés de 9 à 15 mois, des chercheurs démontrent des capacités attentionnelles chez des bébés grâce au suivi du regard et aux capacités d'imitation (Carpenter et al., 1998). D'autre part, dans une étude comparative entre des enfants, des adolescents et des jeunes adultes, il a été montré que dès l'âge de 8 ans les enfants sont capables de produire une réponse inhibitrice (Velanova et al., 2009). Les chercheurs remarquent également que ce qui différencie les trois différents groupes d'âges est le taux de bonnes réponses inhibitrices : avec un taux qui augmente avec l'âge. Ils en concluent que les processus impliqués dans une performance cognitive continuent à progresser jusqu'à l'âge adulte. Dans une autre étude utilisant la tâche de go/no-go et la tâche de stop-signal chez des adolescents et des adultes, les résultats démontrent que la probabilité de réussir un item no-go ou stop augmente avec l'âge (Rubia et al., 2013). Ceci confirme l'évolution progressive des performances au contrôle inhibiteur même encore pendant l'adolescence et l'âge adulte. Une étude longitudinale chez des jumeaux mesurant le nombre d'erreurs aux items no-go à une tâche de go/no-go classique confirme à nouveau cette évolution progressive de l'enfance à l'âge adulte des

performances d'inhibition (Bezdjian et al., 2014). En effet, cette diminution constante de la réponse impulsive (i.e. le taux d'erreurs aux items no-go) correspond aux résultats d'une étude antérieure démontrant une diminution de la réponse impulsive après la préadolescence (i.e. entre 9 et 12 ans), en partie en raison de la maturation du cortex préfrontal (Steinberg, 2010). De plus, l'efficacité du contrôle inhibiteur dépend de la nature (e.g. échanger des jetons par des bonbons ; Mehler & Bever, 1967) et de la complexité de la tâche (Nigg, 2000). Effectivement, par exemple, dans la célèbre tâche de conservation du nombre créée par Jean Piaget, les enfants réussissent habituellement la tâche vers l'âge de 7-8 ans. Cependant, si les jetons utilisés dans cette même tâche sont remplacés par des M&M's®, des enfants âgés entre 2 et 4 ans réussissent la tâche (Mehler & Bever, 1967). Par conséquent, ce résultat suggère que l'heuristique visuelle trompeuse peut être inhibée beaucoup plus tôt que 7-8 ans. Elle révèle surtout que la motivation joue un rôle crucial dans les capacités cognitives alors que les capacités de mémoire de travail évoluent plutôt de manière linéaire jusqu'à l'âge adulte sans dépendre de la tâche ou du contexte (Luna et al., 2010). En effet, les capacités de mémoire de travail suivent une trajectoire de développement prolongée (Demetriou et al., 2002; Luna et al., 2004). Il a été montré dans la littérature que, aussi bien d'un point de vue comportemental que cérébral, les capacités de mémoire de travail sont établies dès l'enfance et même dès la petite enfance (Diamond et al., 1994). De la même manière, le développement du contrôle inhibiteur et les mécanismes soulignant les compétences en mémoire de travail se développent précocement. Cependant ces mécanismes continuent de s'améliorer au cours de l'adolescence (Luna & Sweeney, 2004b; Luna et al., 2010).

Un autre point important à prendre en compte est que l'organisation exécutive est différente chez les enfants et chez les adolescents/adultes. En effet, le système avec trois composantes exécutives distinctes présent chez les adolescents/adultes n'est pas retrouvé chez l'enfant (Sanne et al., 2013). Pendant l'enfance, il y a d'un côté la mémoire de travail et de l'autre la flexibilité cognitive regroupé avec le contrôle inhibiteur, c'est-à-dire que ces deux derniers ne sont pas encore différenciés. De ce fait, les capacités de flexibilité cognitive s'améliorent et s'affinent plus tardivement que les autres composants exécutifs (Best & Miller, 2010; Diamond, 2013). On retrouve cependant l'importance du contrôle inhibiteur et de la mémoire de travail dans

l'apprentissage pendant l'enfance (St Clair-Thomson & Gathercole, 2006). Il semblerait qu'à partir de 10 ans, les capacités de mémoire de travail ainsi que les capacités inhibitrices augmentent en parallèle. En toute logique, si les enfants sont capables de retenir plus d'informations en mémoire, alors celle-ci n'est pas surchargée et l'enfant dispose de plus de ressources cognitives pour mettre en place ses capacités inhibitrices (Davidson et al., 2006; Luna et al., 2015). Les enfants passeront alors d'un recours au contrôle inhibiteur seulement en réponse à leur environnement (i.e. recours réactif) à un recours anticipé et programmé (i.e. recours proactif) (Munakata et al., 2012). On observe deux pics d'amélioration des performances pendant l'enfance : le premier se déroule entre 2 et 5 ans, et le deuxième à l'âge de 12 ans où les performances atteintes pour certains tests standardisés (évaluant les fonctions exécutives) sont similaires à celles des adultes (Zelazo & Müller, 2002) (cf. Figure 2).



**Figure 2 :** Trajectoires développementales estimées des fonctions exécutives. (Anderson et al., 2002).

#### **IV. Trajectoires développementales cérébrales**

Nous avons abordé précédemment les bases neurales des fonctions exécutives. Un point important cependant n'a pas été abordé : leur évolution au cours du développement cérébral. En effet, tout comme les trajectoires développementales comportementales, les trajectoires développementales cérébrales évoluent tout au long de l'enfance et de l'adolescence jusqu'à l'âge adulte, en étant nettement associées au développement cérébral. Par exemple, à l'adolescence les performances comportementales sont identiques à celles des adultes, mais c'est au niveau cérébral qu'il y a des divergences. Dans une tâche cognitive classique, les adolescents recrutent plus de régions cérébrales que les adultes (Luna et al., 2001). Ces dernières serviraient de compléments pour décharger les régions dites exécutives, comme le cortex préfrontal, ce qui leur permet de produire une réponse rapide et efficace malgré des réseaux neuronaux encore immatures. Des études en imagerie fonctionnelle démontrent que, pendant l'adolescence, l'activation cérébrale est amplifiée dans les régions frontales en comparaison à d'autres groupes d'âges (Luna et al., 2001; Ciesielski et al., 2006). Schématiquement, l'évolution de cette activation suit une courbe en U inversé tout au long du développement avec en pointe l'adolescence. Cette période serait le début d'un changement dans les réseaux neuronaux recrutés : le passage d'un réseau local, principalement soutenu par le cortex préfrontal, remplacé par un réseau plus diffus et semblable à celui des adultes (Luna et al., 2010). Ce dernier permettrait de répartir et de partager la charge cognitive donc d'être plus compétent.

Étant donné que les fonctions exécutives sont dépendantes de l'intégrité du lobe frontal, les capacités cognitives vont suivre une amélioration fonctionnelle qui va s'aligner avec le développement neurophysiologique du cortex préfrontal qui continue de se développer pendant l'âge adulte. Le développement des fonctions exécutives est donc intimement lié au développement cérébral, et plus précisément, celui du cortex préfrontal. On en constate une première preuve avec le fonctionnement cérébral des adolescents, abordé plus haut. Une deuxième preuve réside dans le fait que l'implication du cortex préfrontal pendant une tâche cognitive n'est plus à prouver (Baker et al., 1996; Anderson et al., 2002; pour revue voir : Crone & Steinbeis, 2017). Cette région est reliée à plusieurs autres régions cérébrales comme les lobes

temporaux, occipitaux et pariétaux ainsi que les régions limbiques et sous-corticales (Stuss & Benson, 1984). C'est également suite à des études réalisées sur des patients atteints de lésions cérébrales au niveau du cortex préfrontal, que les chercheurs ont mis en lien cette région cérébrale avec les déficits cognitifs (Zelazo & Müller, 2002). Un dommage ou une perte de fonctions dans une de ces régions cérébrales à n'importe quel niveau peut entraîner un déficit cognitif et/ou comportemental (Eslinger & Grattan, 1993; Alexander & Stuss, 2000). En résumé, il est soutenu que le cortex préfrontal est nécessaire mais non suffisant en lui-même pour un fonctionnement exécutif intact (Della Sala et al., 1998). Tout ceci explique également, en partie, pourquoi les fonctions exécutives finissent de se mettre en place si tardivement au cours de la vie. Puisque le cerveau n'est pas parfaitement opérationnel aussi bien au niveau structural que fonctionnel, les capacités exécutives ne peuvent donc pas être optimales. De ce fait, il serait incomplet de parler du développement cognitif (i.e. comportemental) sans l'aborder et le relier directement au développement cérébral.

En comparaison au corps humain qui atteint sa taille et sa morphologie définitives à l'adolescence, le cerveau humain continuera de 'grandir' bien au-delà de cette période. Cependant, les deux premières années de la vie sont cruciales dans le développement cérébral et elles ont un impact sur les capacités cognitives et sur le risque de pathologie, comme la schizophrénie et l'autisme (Gilmore et al., 2018). La maturation cérébrale suit une direction spécifique appelée le gradient postéro-antérieur. Cela signifie que la maturation débute par les régions à l'arrière de la tête, comme les régions sensorimotrices ou visuelles (i.e. cortex occipital) pour terminer par les régions impliquées dans des processus de haut niveau situées à l'avant de la tête, comme le cortex préfrontal ou le cortex pariétal postérieur (Tau & Peterson, 2010). De plus, cette maturation cérébrale implique une dynamique particulière, qui se fait en deux temps. Par exemple, chez le bébé entre le troisième et le quatrième mois de vie, il y a une explosion de formation de synapses dans le cortex visuel primaire. Après le douzième mois de vie, le nombre moyen de connexions par neurones diminue (Tau & Peterson, 2010). Cette étape d'élimination d'axones, de dendrites et de synapses, tout comme la mort neuronale (appelée apoptose) est très importante et permet de contrebalancer la production en surnombre d'axones (appelée la

synaptogenèse), de dendrites et de synapses (Cowan et al., 1984). Ce phénomène est appelé l'élagage synaptique ou *pruning* en anglais. Pour donner une image, c'est comme construire un très grand nombre de sentiers et de routes afin d'explorer un territoire inconnu. Une fois l'exploration terminée, grâce à l'expérience les usagers savent pertinemment quelles routes emprunter. De ce fait, ils savent lesquelles sont les plus fiables et les plus faciles d'accès. Celles-ci seront donc améliorées en devenant des autoroutes, alors que les routes non utilisées seront supprimées. Ces différentes étapes commencent dès la vie périnatale et continuent jusqu'à l'âge adulte (Tau & Peterson, 2010). De plus, le début ou la fin de ces étapes est diffère totalement d'une région cérébrale à une autre (Levitt, 2003). En effet, l'élagage synaptique suit le gradient postéro-antérieur et commence par les aires sensorielles et motrices juste après la naissance, suivies par les aires associatives et le corps calleux, et encore plus tard, par les régions qui soutendent les fonctions exécutives.

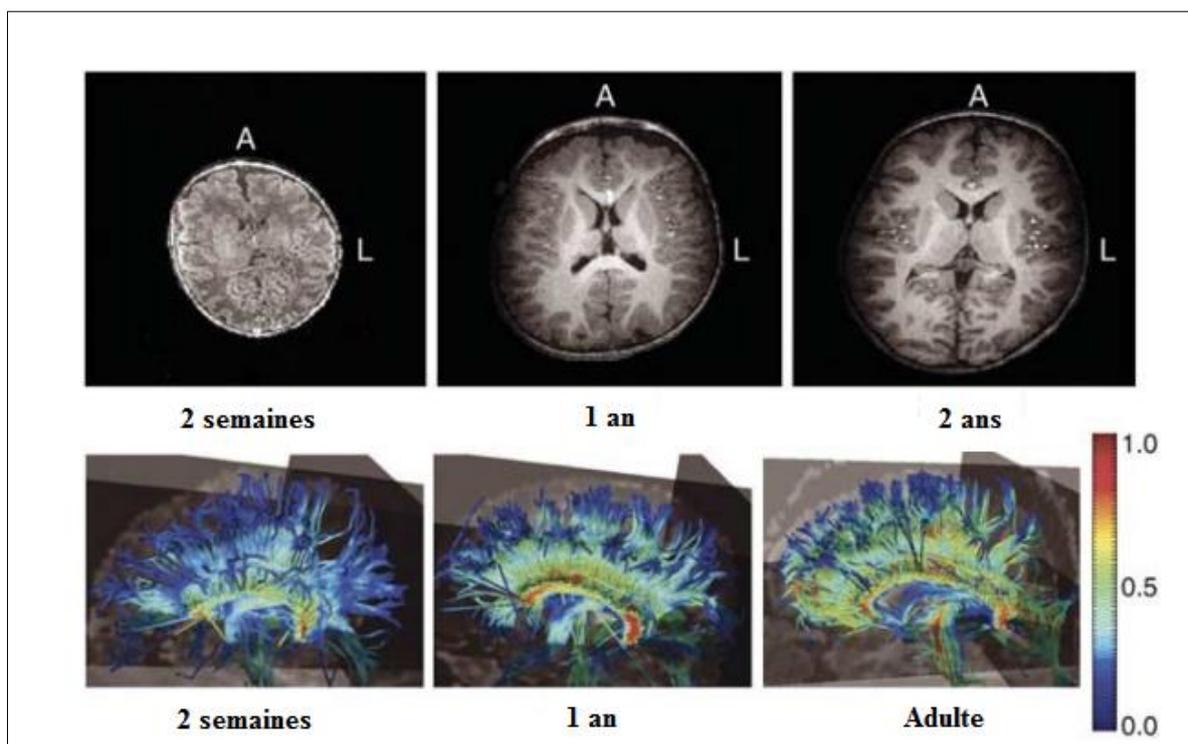
On observe également des différences de trajectoires dans la maturation cérébrale entre la matière blanche et la matière grise, aussi bien au niveau temporel qu'au niveau de la localisation (Tau & Peterson, 2010). La matière grise, appelée également le cortex (i.e. enveloppe ou écorce en latin) contient tous les corps cellulaires des neurones répartis en plusieurs couches horizontales. La matière blanche est composée de tous les axones des neurones qui permettent la communication entre les différentes régions cérébrales. Cette matière blanche représente la moitié du volume total du cerveau (Sampaio-Baptista & Johansen-Berg, 2017). Concernant la matière blanche, le phénomène important à prendre en compte est celui de la myélinisation des axones. La myéline provient des oligodendrocytes (i.e. cellules gliales) qui produisent la gaine de myéline. De ce fait, le potentiel d'action (e.g. le message envoyé) est conduit tout le long de l'axone, ce dernier traverse l'axone en faisant des bonds de gaine de myéline en gaine de myéline. Elles permettent donc une communication beaucoup plus rapide et plus efficace.

La trajectoire développementale de la matière blanche, et donc de la myélinisation, augmente de manière accrue pendant la première année de la vie pour ensuite suivre un rythme plus lent mais régulier et une diminution du volume total au cours de l'âge adulte (cf. Figure 3) (Barnea-Goraly et al., 2005; Gao et al., 2009; Gilmore et al., 2018). Cette maturation suit une

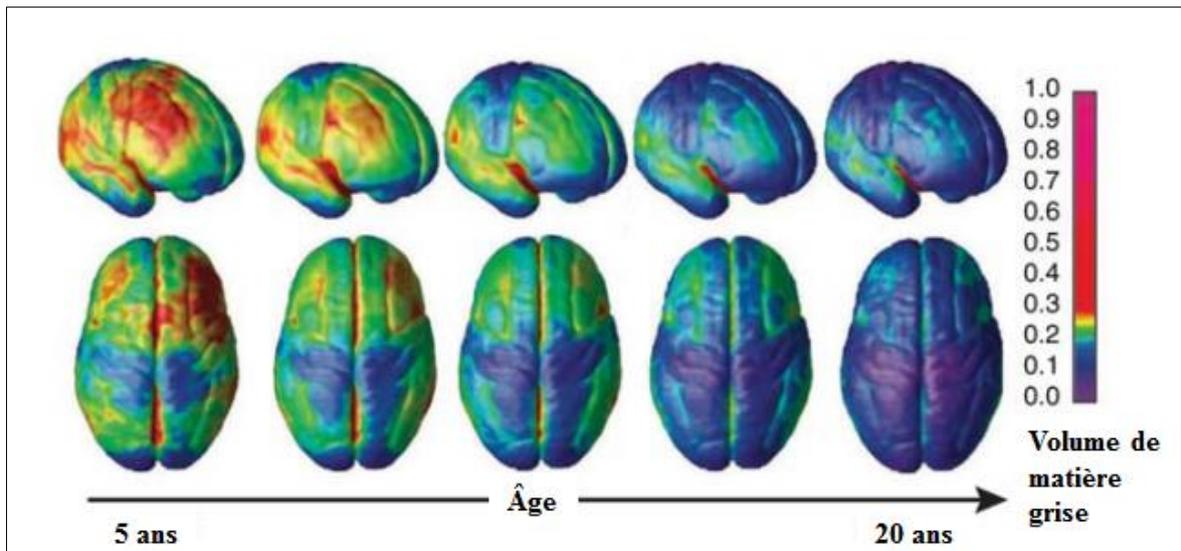
évolution temporelle différente selon les régions cérébrales, à des vitesses variables et de la même manière que la maturation 'globale' : en suivant le gradient postéro-antérieur (Girard et al., 1991; Paus et al., 2001). Une étude en électroencéphalographie (i.e. EEG) a montré une croissance de la myélinisation de la matière blanche dans le lobe frontal qui reflète une augmentation du nombre et de la force des connexions, qui peut être découpée en plusieurs stades (Hudspeth & Pribram, 1990). Le premier stade correspond à une poussée de croissance dans le lobe frontal de la naissance à l'âge de 5 ans, qui coïncide d'un point de vue comportemental à un gain du contrôle attentionnel. Au cours du deuxième stade, il y a une amélioration du traitement de l'information, de la flexibilité, de la planification ainsi que de la prise de décision entre 7 et 9 ans, qui correspond à la deuxième poussée de croissance du lobe frontal. Le troisième stade de croissance se déroule entre 11 et 13 ans, période pendant laquelle presque tous les processus cognitifs deviennent matures et pendant laquelle émerge aussi le contrôle cognitif. La myélinisation induit une transmission plus rapide et efficace des impulsions nerveuses, un meilleur traitement de l'information, ainsi qu'une meilleure intégration des processus cognitifs et un meilleur contrôle exécutif.

La trajectoire développementale de la matière grise est tout autre, avec tout de même quelques points communs comme le fait qu'elle suive le gradient postéro-antérieur, qui débute par les régions à l'arrière de la tête pour terminer par les régions situées à l'avant (cf. Figure 4) (Gogtay et al., 2004; Thomson et al., 2005; Lenroot et al., 2007; Shaw et al., 2008; Gogtay & Thompson, 2010; Gilmore et al., 2018). La diminution du volume total commence beaucoup plus tôt, c'est-à-dire dès l'enfance, et suit une décroissance relativement linéaire (cf. Figure 5). Cette trajectoire est en accord avec ce que l'on sait sur la progression des fonctions exécutives (Tau & Peterson, 2010). C'est-à-dire que cette trajectoire implique la mise en place d'un agencement cognitif plutôt tardif pendant l'enfance en synchronie avec la maturation cérébrale des régions frontales, elle aussi tardive. Il existe aussi une corrélation entre la maturation corticale et la maturation fonctionnelle. Plusieurs études ont démontré que l'amincissement cortical dans des régions motrices est corrélé avec la dextérité, ou encore que l'épaisseur corticale dans les aires du langage de l'hémisphère gauche est corrélée avec les compétences de traitement phonologique

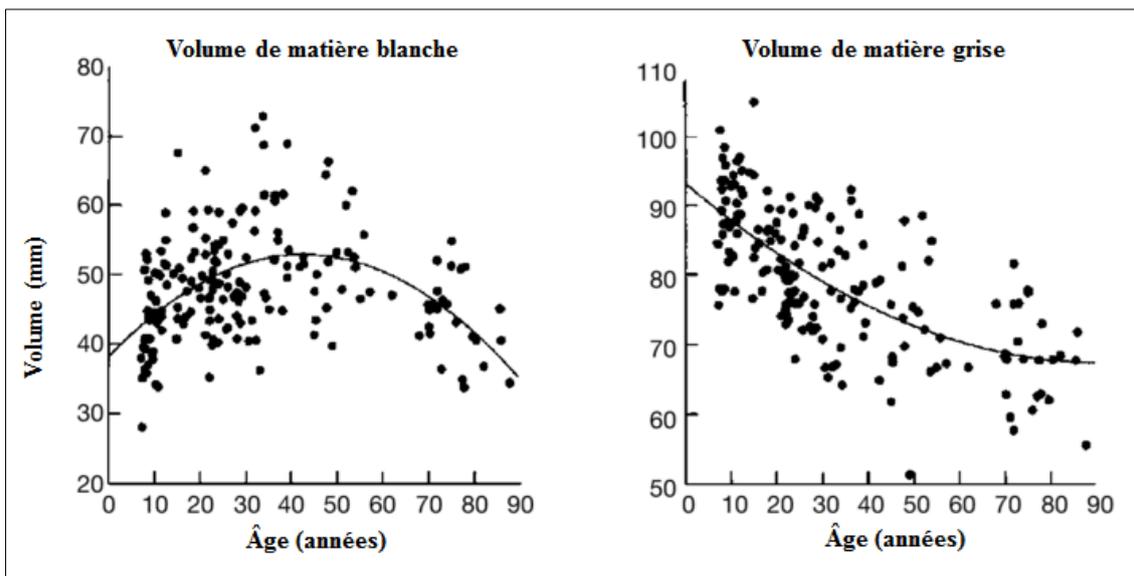
(Sowell et al., 2004; Lu et al., 2007). Une autre étude a démontré que le taux de changement cortical dans les régions impliquées dans les fonctions exécutives (i.e. le cortex pariétal postérieur, le cortex préfrontal supérieur et ventrolatéral) est corrélé avec les mesures d'intelligence (Shaw et al., 2006). Dans une étude sur l'enfance de la schizophrénie, il a été montré que l'élagage synaptique suit un schéma relativement normal chez les schizophrènes, mais à un rythme plus rapide et de manière plus étendue que les enfants avec un développement 'typique' (Thompson et al., 2001). L'amincissement cortical est donc un marqueur fiable de la maturation cérébrale (Tau & Peterson, 2010).



**Figure 3 :** Évolution de la maturation cérébrale de la matière blanche (figure adaptée de Tau & Peterson, 2010).



**Figure 4 :** Maturation de la matière grise (Figure adaptée de Tau & Peterson, 2010).



**Figure 5 :** Volumes de la matière grise et blanche chez des sujets 'sains' acquis grâce à l'IRM. Provenant de Sowell et al. (2003), avec permission. (Figure extraite et traduite de Höistad et al., 2009).

Avec toutes ces données, nous pourrions croire que la synaptogénese disparaît avec l'âge et qu'il n'est plus possible de créer de nouvelles connexions ou neurones passé un certain âge. Or, des études sur les effets de l'entraînement, aussi bien moteur que cognitif, prouvent que la

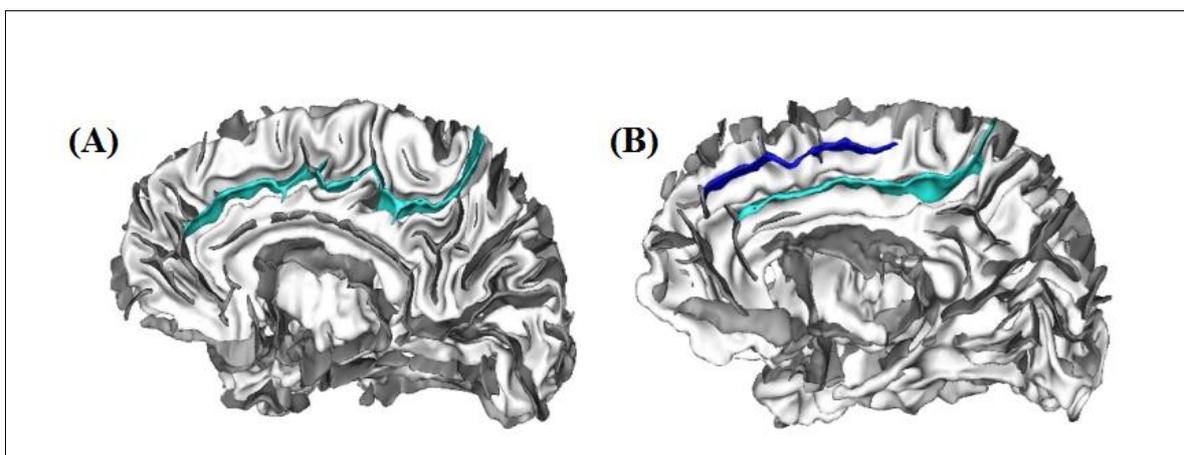
synpatogènese existe toujours et ce, même à un âge avancé, mettant en lumière le phénomène de plasticité cérébrale (cf. Chapitre III). Ces données soulignent toute la complexité du cerveau humain, et le rend passionnant à étudier.

## **V. Facteurs cérébraux influençant l'efficacité des fonctions exécutives**

Plusieurs facteurs cérébraux influencent directement l'efficacité des fonctions exécutives, et plus particulièrement celle du contrôle inhibiteur. Nous allons vous présenter deux types de facteurs neuro-développementaux : les marqueurs qualitatifs et quantitatifs.

Les marqueurs qualitatifs représentent les traits neuro-développementaux qui se forment pendant la vie prénatale et restent stables tout au long de la vie (Cachia et al., 2016). En d'autres termes, ce facteur n'est pas influencé par le développement cérébral, notamment par la maturation, ou encore par l'expérience postnatale (i.e. les apprentissages, métiers, etc.) (Sun et al., 2012). On peut donc catégoriser ce facteur comme étant un marqueur du développement cérébral prénatal, et donc très précoce. Cet élément qualitatif correspond aux plissements corticaux, appelés également sillons (Mangin et al., 2010; Zilles et al., 2013). Il existe un large panel dans la forme, l'étendue ou encore dans le type de motifs sulcaux (Ono et al., 1990 ; Thompson et al., 1996). Dans une étude, Fornito et al. (2004) ont étudié le motif sulcal du cortex cingulaire antérieur de 30 adultes 'sains'. Ils ont catégorisé deux types de motifs : (a) un motif asymétrique, qui comporte un sillon supplémentaire : le sillon paracingulaire dans l'hémisphère gauche uniquement (cf. Figure 6), et (b) un motif symétrique qui comporte également le sillon supplémentaire mais dans les deux hémisphères cérébraux. Les résultats démontrent que les participants présentant un motif sulcal asymétrique gauche au niveau du cortex cingulaire antérieur ont de meilleures performances aux tâches exécutives impliquant les régions frontales en comparaison aux participants avec un motif sulcal symétrique. Les auteurs en concluent que la présence du sillon supplémentaire serait associée à une connexion fonctionnelle plus efficace au niveau du réseau cingulo-frontal, et serait le reflet de meilleures capacités exécutives au niveau

comportemental (Fornito et al., 2004). Ce lien entre de meilleures performances cognitives et le motif sulcal asymétrique a été retrouvé dans une autre étude (Cachia et al., 2014). Dans celle-ci, les enfants de 5 ans avec un motif sulcal asymétrique au niveau du cortex cingulaire antérieur ont de meilleurs résultats à une tâche de Stroop, adaptée aux jeunes enfants ne sachant pas lire (i.e. Stroop animal), comparé aux enfants avec un motif sulcal symétrique. La présence de ce motif sulcal asymétrique est un prédicteur des capacités exécutives. En effet, ces mêmes enfants de 5 ans avec un motif asymétrique du cortex cingulaire antérieur gardent de meilleures performances à la tâche du Stroop à l'âge de 9 ans comparé aux mêmes enfants avec un motif symétrique du cortex cingulaire antérieur (Borst et al., 2014). Une autre étude encore démontre que le motif du sillon frontal inférieur jouerait un rôle primordial dans l'efficacité du contrôle inhibiteur (cf. Figure 7) (Tissier et al., 2018). En effet, aussi bien chez les enfants que chez les adultes, les personnes avec un motif sulcal asymétrique au niveau du cortex cingulaire antérieur ou du sillon frontal inférieur ont de meilleurs scores d'interférence au Stroop comparé à ceux qui ont un motif sulcal symétrique. Ce sillon asymétrique est donc un marqueur cérébral anatomique de la cognition (Borst et al., 2016; Cachia et al., 2016), et il permet d'expliquer une partie des différences interindividuelles dans les capacités cognitives (i.e. les performances) (Shenkin et al., 2004; Raznahan et al., 2012).

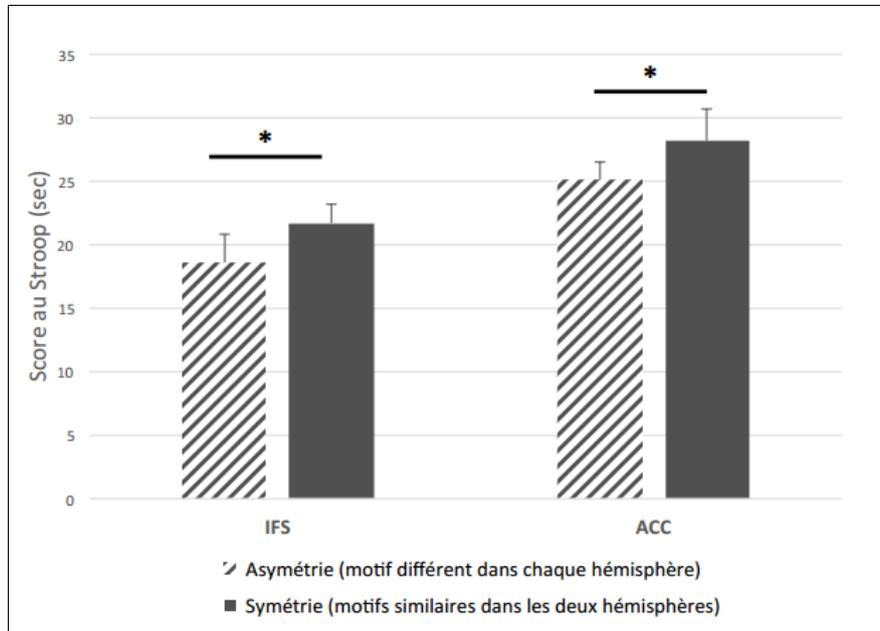


**Figure 6** : motifs sulcaux du cortex cingulaire antérieur, (A) cerveau avec un sillon cingulaire : motif symétrique (bleu clair), (B) cerveau avec sillon cingulaire et un sillon para-cingulaire : motif asymétrique (bleu foncé).

À l'opposé des marqueurs qualitatifs, on retrouve les marqueurs neuro-développementaux quantitatifs. Ces derniers évoluent avec l'âge. Ils représentent par exemple l'épaisseur corticale ou le volume de matière grise (Westlye et al., 2011; Takeuchi et al., 2012; Fjell et al., 2012). Contrairement aux marqueurs qualitatifs, ils sont très sensibles et influencés par l'expérience. Ils sont clairement associés à la plasticité cérébrale. Cette dernière représente la capacité à s'adapter et à tirer les avantages des expériences vécues (Souders et al., 2017). On peut la distinguer en deux types de plasticité différentes : la plasticité neuronale ou cognitive (Souders et al., 2017). La première représente les changements de structure cérébrale au niveau neuronal (i.e. cellulaire) stimulés par l'expérience. La deuxième correspond aux changements dans la stratégie cognitive utilisée.

Sans prendre en compte l'expérience, plusieurs études en imagerie anatomique ont mis en lien la structure anatomique du cerveau, comme l'épaisseur corticale (Westlye et al., 2011) ou le volume de matière grise (Takeuchi et al., 2012), avec les performances cognitives. Plus précisément dans l'étude de Takeuchi et al. (2012), les résultats montrent une relation entre les performances à la tâche de Stroop et le volume de matière grise au niveau du cortex cingulaire antérieur, du gyrus frontal inférieur droit et du cervelet. Cela signifie que, plus le score d'interférence est faible (i.e. reflet de bonnes capacités d'inhibition), plus le volume de matière grise de ces régions est important. Ceci confirme l'implication de ces régions pendant une tâche d'inhibition, puisque le débat persistait malgré les premiers résultats en IRMf (MacLeod & MacDonald, 2000), et appuie le fait que l'anatomie cérébrale peut-être un marqueur de l'efficacité des fonctions exécutives. Il en est de même pour les enfants, avec par exemple l'étude de Fjell et al. (2012) qui démontre que le score à une tâche cognitive est directement relié à la surface corticale au niveau du cortex cingulaire antérieur droit, avec une relation plus forte avec la surface de matière grise qu'avec celle de la matière blanche. Une des conclusions de cette étude est qu'il est nécessaire de prendre en compte différents aspects de la maturation cérébrale, notamment ceux de la matière grise et blanche, pour comprendre les fondements du développement cognitif. Ce marqueur quantitatif neuro-développemental permet donc de 'contrer' l'impact des marqueurs qualitatifs. En d'autres termes, la génétique ainsi que le développement précoce *in*

*utéro* n'ont pas le dernier mot, et ils peuvent être compensés par un entraînement ou par l'expérience.



**Figure 7** : Score à la tâche de Stroop en secondes selon le motif asymétrique ou symétrique du sillon frontal inférieur (IFS) et du cortex cingulaire antérieur (ACC) (figure extraite de Tissier et al., 2018).

## VI. Conclusion

Comme démontré tout au long de ce chapitre, les fonctions exécutives tiennent une place centrale dans des domaines nombreux et variés. Elles sont également étroitement liées à l'organisation cérébrale ainsi qu'à sa maturation. On peut désormais se demander comment les fonctions exécutives se mettent-elles en place pendant l'enfance et quelle est leur évolution pendant l'adolescence.

## **CHAPITRE II :**

### **Le rôle des fonctions exécutives dans le développement cognitif**

---

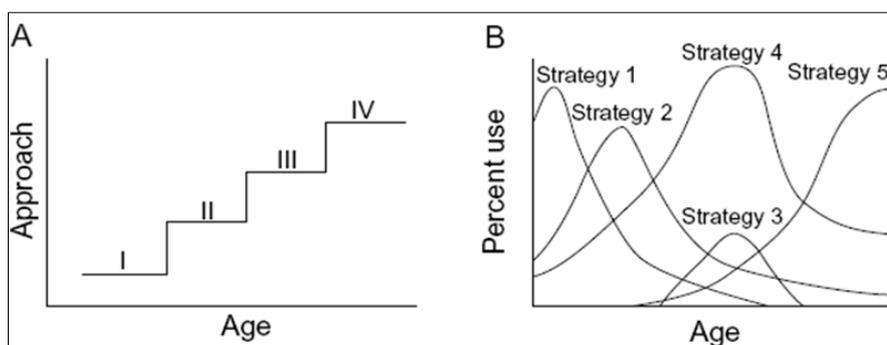
#### **I. Les modèles du développement cognitif**

##### **a. Modèle Piagétien**

L'un des challenges pour comprendre le développement des fonctions exécutives chez les enfants est qu'il faut prendre en compte que les capacités cognitives se développent rapidement et tout au long de l'enfance (Anderson et al., 2002). C'est clairement ce que Jean Piaget a tenté de faire. Jean Piaget est un biologiste et un psychologue suisse (1896-1980). Il est aussi et surtout le grand précurseur de la psychologie du développement. Son approche est pluridisciplinaire : elle lie directement la biologie à la psychologie du développement. Il considère que tout individu a la capacité de s'adapter à son environnement. Il en fait même une définition de l'intelligence. Piaget introduit également la notion que la pensée humaine n'est pas innée, mais qu'elle se construit de manière progressive au contact avec le monde et ce, plus particulièrement pendant l'enfance. Cette vision correspond au courant constructiviste. De manière ambitieuse, il modélise une théorie de l'intelligence structurée en stades ponctués par des temps forts.

Dans un premier temps, il différencie l'intelligence du bébé (0-2 ans) de celle de l'enfant (2-12 ans). Le premier stade du développement est appelé le stade sensori-moteur (0-2 ans). Au cours de celui-ci, le bébé interprète le monde qui l'entoure grâce à ses sens (i.e. sensori) et à ses actions (i.e. moteur). Pendant les premières années de la vie, c'est grâce à l'imitation que le bébé va appréhender le monde qui l'entoure. Ici, l'imitation a toute son importance. De fait, cette action démontre que le bébé est capable d'observer l'adulte et de reproduire l'action vue. Ceci est le reflet de l'avancée au cours de ce premier stade. Cette imitation se perfectionne encore avec l'âge, par exemple à partir de 2 ans l'enfant est capable de réaliser des imitations de manière différée. Encore une fois, cette étape est le signe de changements dans le développement de l'intelligence

des enfants. Cette intelligence devient 'symbolique' ou 'représentative' (i.e. représentation mentale). En d'autres termes, l'imitation différée prouve une évolution de la pensée chez l'enfant, capable d'imiter une action mentalisée pour être capable de la réaliser plus tard. Le jeu également apparaît et tient une place primordiale dans le développement de l'intelligence, (e.g. l'enfant qui utilise la télécommande comme téléphone portable). À deux ans, l'enfant mentalise et intériorise ce qu'il a appris grâce à ses sens et à ses actions. Dans un deuxième temps, les enfants rentrent dans le stade de la préparation des opérations mentales (2-7 ans), pendant lequel les actions deviennent des représentations mentales (travaillées et intégrées), et plus seulement des actions réalisées immédiatement. Plus tardivement, dans un troisième temps, les enfants vont perfectionner ces opérations mentales pendant le stade de la mise en place des opérations concrètes (7-12 ans). Ici, de nouvelles représentations mentales naissent telles que le nombre ou la catégorisation. Enfin, le dernier stade s'appelle le stade des opérations formelles (12-16 ans). L'enfant devient alors adolescent et par conséquent, il est apte à raisonner face à des problèmes logiques ou encore sur des hypothèses. En résumé, les stades de l'intelligence commencent par des actions instructives chez le bébé pour finir à la pensée logique de l'adolescent. Il faut noter également que la succession des stades se fait par étapes cumulatives, et donc de manière linéaire. Une fois un stade 'maîtrisé' ou 'acquis' en terme de progrès, le suivant prend le relais. On peut l'illustrer comme étant un modèle en "escalier" où chaque marche correspond à un progrès et à un stade différent (cf. Figure 8). Ce modèle se base donc directement sur les performances cognitives des enfants et sur leur évolution (Dennis, 1989; Anderson et al., 2002).



**Figure 8 :** (A) Modèle en escalier, développement linéaire et cumulatif (adapté de Piaget & Inhelder, 1966). (B) Modèle de Siegler, développement non-linéaire et dynamique (adapté de Siegler, 1999).

Pour accompagner sa théorie, Jean Piaget a mis au point plusieurs tâches permettant de tester et d'illustrer les capacités des enfants au cours du développement. Une des plus emblématiques est la tâche de conservation du nombre (Piaget & Szeminska, 1941). Dans cette tâche, l'expérimentateur place une rangée de jetons en face de l'enfant et lui demande de reproduire une deuxième rangée de même longueur et comprenant le même nombre de jetons. C'est à partir de 5-6 ans que l'enfant est capable de réaliser les deux étapes de cette consigne : faire une ligne de même longueur comprenant le même nombre de jetons. Avant 5 ans, seulement une des deux dimensions de la consigne est prise en compte par l'enfant, c'est-à-dire réaliser une deuxième rangée de même longueur qui ne contient pas le bon nombre de jetons. Ensuite, l'expérimentateur, sans rajouter ni enlever de jetons, écarte les jetons d'une des deux rangées et il demande à l'enfant s'il y a le même nombre de jetons dans les deux lignes. Avant 7-8 ans les enfants considèrent que la ligne la plus longue est celle qui contient le plus de jetons. Ici ils sont piégés par l'heuristique visuelle 'longueur égal nombre'. C'est donc vers 7-8 ans que les enfants vont pouvoir être capables de prendre en compte la transformation faite sur l'une des deux rangées de jetons (i.e. l'écartement) et d'effectuer l'opération mentale inverse. Il s'agit donc pour eux d'annuler mentalement l'écartement des jetons et de se rendre compte que, même si les deux lignes diffèrent sur une dimension (ici la longueur), elles peuvent être identiques sur une autre : le nombre de jetons. Les enfants deviennent donc conservants et ils sont capables de réversibilité mentale. Par conséquent, nous pouvons conclure que la difficulté de la tâche de conservation du nombre est d'inhiber le biais visuel (i.e. l'heuristique 'longueur égal nombre') qui n'est pas toujours faux. En effet, une ligne de 10 jetons est, la plupart du temps, plus longue qu'une ligne de 5 jetons. Le biais visuel 'longueur égal nombre' étant très présent et fréquent, mais restant ici trompeur, il surpasse la stratégie logique. L'erreur des enfants non-conservants s'explique par un défaut d'inhibition.

En plus de la logique du nombre, selon Jean Piaget, les enfants doivent aussi comprendre la logique des classes d'objets. Pour cela, ils doivent être capables de combiner deux critères (Piaget & Inhelder, 1959). Le premier est appelé la compréhension, il correspond aux ressemblances entre les éléments d'une même classe et aux différences avec les autres classes.

Le deuxième est appelé l'extension, il correspond aux éléments mesurables d'une classe selon sa compréhension. Par exemple, dans la tâche de quantification de l'inclusion, (A) 10 marguerites et (A') 2 roses sont présentées aux enfants. Une fois avoir vérifié que l'enfant est capable de prendre en compte que les deux sous-classes (A : les marguerites et A' : les roses) appartiennent à la même classe emboîtante (B : les fleurs), il lui est demandé s'il y a plus de marguerites ou plus de fleurs. Ici, la compréhension permet de distinguer trois classes : les marguerites (A), les roses (A') et les fleurs (B), et l'extension permet de compter le nombre d'éléments dans chaque classe (i.e.  $A + A' = B$ ). Suite à cette tâche, Jean Piaget identifie trois stades. Pour le premier, l'enfant répond qu'il y a plus de marguerites que de fleurs, comparant la différence de quantité entre les marguerites et les roses en 'oubliant' de prendre en compte la classe emboîtante (i.e. B : les fleurs). Dans le deuxième stade, la bonne réponse de l'enfant sera directement influencée par la différence de quantité dans les deux sous-classes. Dans le dernier stade, l'enfant réussit la tâche quelles que soient les différences de quantité et le contexte. L'enfant est donc capable de classer les objets qui l'entourent.

Pour finir, une autre tâche emblématique créée par Jean Piaget est la tâche des trois montagnes (Piaget & Inhelder, 1948). Ici, l'expérimentateur présente aux enfants une maquette représentant trois montagnes. Du point de vue de l'enfant, la montagne sur sa droite est verte avec une maison à son sommet, à sa gauche la montagne a une croix à son sommet et enfin au milieu il y a une montagne grise avec de la neige au sommet. Il existe deux types de consignes différentes dans cette tâche. Dans la première, différentes images sont présentées aux enfants, celles-ci représentent le massif montagneux sous différentes perspectives, et les participants doivent trouver l'image correspondant au point de vue d'une poupée placée sur la maquette du massif. Dans la deuxième, les enfants doivent placer la poupée selon la perspective de l'image présentée. Le but de cette tâche est de mesurer la capacité de l'enfant à dévier de sa propre perspective du monde pour adopter celle d'un autre. Avant l'âge de 7 ans l'enfant est incapable d'adopter la perspective d'autrui (i.e. celle de la poupée). Entre 7-8 ans, l'enfant démontre encore des difficultés à 'bloquer' sa perspective égocentrée avec cependant un début de différenciation entre son propre point de vue dans l'espace et celui d'autrui. Enfin, à l'âge de 8-9 ans, l'enfant

devient capable de réaliser la tâche parfaitement. Par conséquent, il acquiert la capacité de prendre en compte plusieurs perspectives sur un même objet, mais il prend également conscience que l'apparence d'un même objet change en fonction de la perspective adoptée.

L'approche piagétienne se caractérise donc par un développement cognitif linéaire, cumulatif et influencé par les interactions qu'a l'enfant avec son environnement. L'enfant est donc considéré par Jean Piaget comme acteur au cours de son développement. En d'autres termes, dans sa vision constructiviste du développement de l'intelligence l'action tient une place primordiale : l'enfant se développe en agissant sur le monde qui l'entoure. Cette conception prend également en compte le fait que les stades se succèdent toujours dans le même ordre, mais également le fait que chacune des compétences acquises au cours d'un stade fusionne avec les précédentes, qui servent de 'base' pour de nouvelles compétences plus complexes.

La force de la théorie piagétienne réside dans le fait que certains résultats comportementaux ont été répliqués sur de grands échantillons d'enfants. Cependant, il existe quelques faiblesses. En effet, la conception de l'évolution du développement de l'intelligence de l'enfant en stades implique que les enfants ont tous les mêmes compétences à un même stade donné et donc qu'ils raisonnent de la même manière face à des problèmes identiques ou différents. Ceci cependant ne s'accorde pas avec les décalages de performances observés entre différentes tâches. Par exemple, les enfants sont capables de réaliser la tâche de conservation du nombre aux alentours de l'âge de 6 ans, alors que c'est à partir de 8-10 ans que les conservations de la substance et du poids sont acquises (Elkind, 1961a; Katz & Beilin, 1976; Miller, 1976b). Une autre faiblesse également est le fait de ne pas prendre en compte les effets bénéfiques de l'apprentissage, permettant aux enfants d'acquérir des compétences en avance par rapport à leur développement. Par exemple, un entraînement à la tâche de conservation du nombre permet à la majorité des enfants non-conservants de devenir conservants (Halford & Fullerton, 1970).

## **b. Modèle néo-piagétien**

Suite aux limites soulevées concernant le modèle piagétien, plusieurs auteurs ont repensé le modèle. Une nouvelle approche dans la psychologie cognitive du développement est née : l'approche néo-piagétienne, notamment au début des années 1990 avec Juan Pascual-Leone, Kurt Fischer et Robbie Case. Cette approche cherche à comprendre le développement cognitif tout en prenant en compte les décalages et les différences de performances individuelles.

Le modèle néo-piagétien présente tout de même des convergences avec le modèle piagétien. En effet ces deux modèles considèrent : (1) qu'au cours du développement cognitif des stades peuvent être identifiés ; (2) que les compétences acquises au cours d'un stade s'associent pour permettre d'accéder à des compétences plus complexes au stade suivant ; et (3) que dans un contexte idéal, ces compétences apparaissent aux mêmes âges. Cependant l'approche néo-piagétienne apporte de nouvelles hypothèses, elle considère : (4) qu'une partie des compétences est 'domaine-spécifique' ; (5) qu'il y a des différences intra et interindividuelles dans la vitesse et le schéma d'acquisition de ces compétences et selon le domaine (e.g. un enfant en 'avance' dans l'acquisition du langage avec du retard dans les compétences logico-mathématiques et inversement chez un autre enfant) ; (6) que la même forme générale d'organisation peut être présente dans une variété de domaines, sans qu'aucun de ces domaines n'ait la primauté sur un autre (e.g. logico-mathématique versus langage) ; et enfin (7) que la structure de la pensée des enfants est définie d'une manière qui ne se limite pas à un domaine ou un type de fonctionnement mental particulier (Case, 1987b).

Dans le modèle de Juan Pascual-Leone, les stades au cours du développement cognitif sont caractérisés par l'amélioration des performances de deux processus cognitifs : la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur. Il lie également ces deux composantes exécutives avec le cortex préfrontal. Par conséquent, il estime que le passage d'un stade à un autre s'effectue grâce à l'amélioration des performances cognitives en terme de capacités de mémoire de travail et d'inhibition, directement apparentée à la maturation du cortex préfrontal.

Dans le modèle de Kurt Fischer, ce dernier considère que le développement cognitif est synonyme du développement des habilités (i.e. *skills* en anglais). Il définit ces habilités comme des compétences propres aux individus et dépendantes du contexte. Elles sont donc spécifiques mais elles peuvent aussi se généraliser, par exemple le niveau d'un joueur de tennis spécialisé sur terre battue versus le niveau de ce même joueur sur terrain dont il n'est pas spécialiste. Ensuite, cet auteur considère que l'évolution au stade suivant se fait par le biais de facteurs biologiques, tels que la maturation cérébrale, alors que le développement des habilités au cours d'un stade donné s'accomplit grâce à l'interaction entre l'organisme et son environnement, en d'autres termes grâce à l'expérience.

Le modèle de Robbie Case apporte deux notions fondamentales dans l'approche néo-piagétienne : l'idée d'automatisation, qui permet de comprendre la formation des heuristiques, et l'idée de contraintes précoces (e.g., maturation) et tardives (e.g., apprentissage) sur le développement cognitif. Le passage d'un stade à un autre dépend d'une certaine hiérarchie : les compétences acquises pendant un stade augmentent en nombre et se complexifient jusqu'à atteindre le stade suivant. L'évolution au cours des sous-stades et des stades est directement reliée à l'automatisation de certaines actions grâce à leurs utilisations intensives et répétées, qui libère de l'espace en mémoire à court-terme. Mais elle est également due à la maturation des aires corticales impliquées dans les actions utilisées par l'enfant dans un stade donné.

Les approches néo-piagésiennes apportent donc de nouvelles hypothèses et de nouveaux facteurs permettant d'expliquer, en partie, le développement cognitif pendant l'enfance. Cependant, ces approches continuent de considérer l'évolution du développement comme linéaire et cumulatif. Aussi, le passage d'un stade à l'autre se traduit par une augmentation des performances cognitives et par une complexification de ces compétences, qui permettent la création de nouvelles compétences. Mais la découverte de capacités numériques précoces chez le bébé et d'erreurs tardives de raisonnement chez l'adulte contredisent cette vision linéaire et cumulative du développement cognitif.

### c. **Système noyaux et neuroconstructivisme**

Plusieurs études ont démontré l'existence de capacités cognitives chez le bébé et chez l'enfant beaucoup plus précocement que l'avait estimé Jean Piaget, tout particulièrement en ce qui concerne la construction du nombre, que nous allons vous présenter. C'est également suite à ces découvertes qu'un nouveau cadre théorique a émergé : le modèle neuroconstructiviste.

En effet, dès l'âge de 6-9 mois les bébés démontrent des capacités numériques (Starkey et al., 1990). Dans une première partie de l'étude, les bébés détectent les changements dans le nombre d'objets affichés (i.e. passé de 2 à 3 et de 3 à 2). Cette étude prouve qu'ils détectent et portent leur attention (i.e. leur regard) aux propriétés numériques des objets qui leur sont présentés visuellement. Dans une deuxième partie de l'étude, les chercheurs ont approfondi leurs résultats en présentant des stimuli auditifs (i.e. battements de tambour). Ici les bébés préfèrent les items qui présentent des stimuli visuels et auditifs congruents, c'est-à-dire que le nombre de stimuli visuels et auditifs présentés est identique (e.g. 2 objets avec 2 sons ou 3 objets avec 3 sons). Ils semblent davantage capables de détecter les ressemblances que les différences et y sont également plus sensibles. Dans une autre étude réalisée chez le bébé, il a été montré que ceux-ci étaient également en mesure de faire des opérations telles qu'une addition ou une soustraction (Wynn, 1992 & 2000). Dans cette expérience, le bébé est placé en face d'un théâtre de poupées où se trouve un premier Mickey installé. L'expérimentateur ferme le rideau et y ajoute de manière visible un deuxième Mickey aux côtés du premier. Ensuite, deux situations sont montrées au bébé. Une fois le rideau ouvert, dans la première condition, deux Mickeys apparaissent (i.e. condition contrôle), et dans la deuxième, trois Mickeys apparaissent. Cette dernière condition est également appelée la condition impossible (i.e. condition test). Dès l'âge de 4-5 mois, les bébés portent davantage leur regard sur les trois Mickeys dans la condition impossible que dans la condition contrôle. Ce résultat prouve que les nouveaux nés sont capables d'effectuer des opérations numériques simples. Dans une autre étude, des additions et des soustractions avec des grands nombres (e.g.  $5 + 5$  ou  $10 - 5$ ) ont été présentées à des bébés âgés de 9 mois (McCrink & Wynn, 2004). Les résultats prouvent que les bébés sont capables de réaliser des calculs numériques sur de grands nombres. Ces recherches suggèrent que les êtres humains possèdent un système

précoce qui appuie la combinaison et la manipulation numériques, avant même que le langage ne se développe. Par conséquent, certains auteurs qualifient les compétences numériques comme des capacités innées, appelées également système-noyaux, qui ne sont pas liées à la culture ou à l'espèce (Wynn, 1990 & 2000; Spelke, 1994, 2000 & 2004; Spelke & Kinzler, 2007). Une étude réalisée chez des singes a prouvé que ceux-ci étaient capables de discriminer deux nombres différents (Hauser et al., 2003). Les chercheurs en concluent que les êtres humains ne sont pas la seule espèce à être spontanément attentive aux nombres, mais également que ce système non-symbolique découle d'un mécanisme de calculs anciens et évolutifs. Selon Elizabeth Spelke, le système exécutif se développe sur la base de ces compétences innées, ce qui crée une contrainte sur la nature et sur la façon dont les bébés perçoivent le monde qui les entoure. Ces compétences innées vont donc influencer directement le développement cognitif tout en devenant de plus en plus complexes. Ce dernier point est en accord avec les modèles piagétiens et néo-piagétiens qui considèrent le développement comme cumulatif et linéaire. Cependant, cette vision ne coïncide pas avec le fait que des enfants commettent des erreurs qu'ils ne faisaient pas étant plus jeune dans les tâches piagésiennes par exemple. Ces erreurs, si on suit ce raisonnement, en fonction du stade ne devraient plus exister et par conséquent elles s'apparentent à des régressions cognitives. Ces éléments ne coïncident pas avec le fait que les adultes commettent des erreurs tardives dans des tâches de raisonnement simple. Un point d'explication est apporté par le modèle théorique d'Annette Karmiloff-Smith. Cette auteure considère que les tâches utilisées chez les bébés et les enfants impliquent des représentations différentes. Les tâches proposées aux bébés requièrent les représentations implicites, alors que les tâches piagésiennes mesurent les représentations explicites des enfants. Ceci s'explique au niveau comportemental par l'apparition ou la disparition de compétences cognitives chez l'enfant. De plus, ces progressions et ces régressions sont spécifiques à certains domaines exécutifs et elles peuvent apparaître à différents âges (e.g. performances à la tâche de conservation du nombre de Jean Piaget). En effet, et de manière un peu contradictoire, il a été observé qu'il y avait une régression de performances cognitives entre 11 et 13 ans, et plus particulièrement concernant la régulation émotionnelle et la prise de décision (Anderson et al., 1996 & 2001). Cette période serait le reflet de la compétition entre plusieurs

stratégies cognitives. Ceci redéfinit complètement la vision piagétienne du développement cognitif. Selon ce modèle, le développement est donc dynamique et non-linéaire, tout en considérant à l'opposé que le développement des mécanismes cognitifs (i.e. les représentations) reste linéaire et cumulatif.

Grâce à l'émergence des techniques d'imagerie cérébrale, telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM), un nouveau modèle théorique est né : le neuroconstructivisme (Mareschal et al., 2007; Westermann et al., 2007; Sirois et al., 2008; Karmiloff-Smith, 2009). Ce modèle relie de manière étroite le développement cognitif comportemental au développement cérébral anatomique et fonctionnel. Il garde les bases du cadre constructiviste puisque que les compétences se construisent sur le socle de compétences plus simples et qu'elles augmentent au cours du développement. Un autre des principes de ce modèle est que les compétences sont directement influencées par les aspects génétiques, neuronaux et environnementaux. Par exemple, chez des individus aveugles de naissance, l'aire visuelle primaire ne recevant pas de stimuli visuels va s'ajuster pour recevoir et traiter les stimuli tactiles et kinesthésiques. En effet, une étude en imagerie fonctionnelle (IRMf) a démontré une activation cérébrale dans cette région pendant la lecture en braille (Sadato et al., 1996). Ce résultat prouve l'influence réciproque entre stimulations extérieures et organisation cérébrale anatomique ainsi que fonctionnelle. Cependant, un point reste identique à la théorie piagétienne, celui concernant l'aspect cumulatif et linéaire du développement cognitif chez les enfants. En plus des compétences arithmétiques précoces chez les bébés, une autre preuve contredit ce point : les erreurs tardives de raisonnement chez l'adulte.

Le modèle théorique de Robert Siegler propose donc une nouvelle vision du déroulé du développement cognitif chez l'enfant. Ce modèle abandonne l'image d'un développement linéaire et cumulatif en escalier, au profit de l'image d'un développement dynamique et non-linéaire formant 'des vagues qui se chevauchent' (cf. Figure 8, p.28) (Siegler, 1987, 1995, 1998 & 2007). Ce point de vue permet d'illustrer l'idée que plusieurs stratégies cognitives peuvent se chevaucher et que leurs fréquences d'usage changent sans arrêt, avec par moment des stratégies dominantes. Cette conception permet d'expliquer les trajectoires développementales qui varient avec l'âge et

le contexte, mais elle permet aussi d'expliquer l'apparition et la disparition de compétences, ce qui reflète un conflit entre les nouvelles compétences et les compétences déjà acquises. De plus, face à un même problème il existe plusieurs stratégies pour le résoudre. Par exemple pour résoudre une opération arithmétique simple, l'enfant peut décider de compter sur ses doigts, de réaliser l'opération mentalement ou de retrouver la réponse en mémoire.

#### **d. L'inhibition : un nouveau modèle théorique**

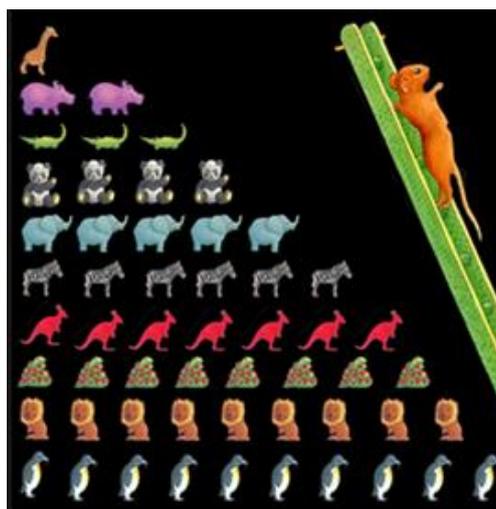
De manière générale, pour comparer les performances cognitives des enfants on prend comme référence les performances des adultes. Cependant, il faut garder à l'esprit que cette référence est loin d'être un modèle 'parfait' ou encore 'idéal'. En effet, par exemple, même à l'âge adulte des erreurs de raisonnement persistent (Kahneman, 2012). Dans une étude utilisant une tâche de raisonnement simple, la majorité des adultes est incapable de déterminer la bonne réponse. Dans cette tâche, les adultes ont pour consigne de falsifier la règle qui leur est présentée : « S'il n'y a pas un carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite » en choisissant parmi un ensemble de figures géométriques (i.e. ronds, carrés et losanges) de différentes couleurs (i.e. jaune, rouge, bleu, vert). Le fait que la négation soit dans la première partie de l'énoncé, appelée l'antécédent, met en difficulté les adultes (Evans, 1972). Les adultes sélectionnent majoritairement les deux figures citées dans la règle à rendre fausse (i.e. un carré rouge et un cercle jaune). Cette erreur de logique, appelée également le biais d'appariement, est le reflet de l'incapacité des adultes à se décentrer des figures présentes dans l'énoncé et à en présenter d'autres en réponse (Evans, 1989; Evans & Over, 1996; Houdé et al., 2000; Evans & Frankish, 2009). Le modèle classique de raisonnement oppose deux processus exécutifs : le *Système 1* et le *Système 2*. Ici les adultes se font piéger par des réponses intuitives, appelées également heuristiques. Ces réponses sont rapides, cognitivement peu coûteuses et peuvent être vraies comme fausses. Ce système de réponses correspond au *Système 1*. La difficulté ici est d'inhiber ce système rapide et intuitif en faveur d'un système plus efficace et analytique, mais plus coûteux et plus lent à mettre en place, appelé le *Système 2*. Ces deux systèmes fonctionnent en parallèle et peuvent entrer en conflit. Dans ce cas, la solution proposée par le système heuristique est de nature à biaiser notre

raisonnement (Kahneman, 2011). Cependant le modèle à deux systèmes n'est pas suffisant pour expliquer les erreurs tardives de raisonnement chez l'adulte dans les tâches de raisonnement. Il faut prendre en compte l'existence d'un troisième système appelé le *Système 3* (Houdé, 2000; Borst, Aïte, & Houdé, 2015; Houdé & Borst, 2015). Ce système supplémentaire sert d'aiguilleur entre les deux autres composantes en bloquant/inhibant le *Système 1* pour faciliter le *Système 2*. Ce troisième système est directement lié au développement du cortex préfrontal (siège des fonctions exécutives), il permet donc de mieux comprendre le développement cognitif de l'enfant ainsi que les différences et décalages de performances en terme de contrôle inhibiteur. En effet, pendant l'enfance le cerveau est encore 'immature' ce qui reflète un *Système 3* moins efficace pour stopper les heuristiques. Par conséquent, en général le *Système 1* serait largement plus dominant que le *Système 2*. Dans une étude en tomographie par émission de position (TEP) réalisée chez des adultes et reprenant la tâche de raisonnement simple de Jonathan Evans (Houdé et al., 2000), les résultats démontrent que les adultes ne réussissant pas la tâche activent davantage des aires visuelles. Or, ces mêmes adultes, après avoir suivi un entraînement à l'inhibition de seulement quelques minutes (i.e. 20 minutes), améliorent leurs performances au niveau comportemental. Au niveau cérébral, ils passent d'un réseau situé à l'arrière du cerveau, représentant les aires visuelles, à un réseau situé à l'avant du cerveau, plus précisément la région préfrontale, représentant les aires impliquées dans les processus exécutifs de haut niveau tels que l'inhibition. Pour réussir cette tâche de raisonnement, il faut inhiber le biais visuel d'appariement à l'aide du *Système 3* afin d'activer le *Système 2*.

Il va sans dire que l'adulte n'est pas un modèle de référence 'parfait' ou 'idéal', mais de la même manière, les enfants sont loin d'être totalement 'inefficaces' ou candides. En effet, après une erreur de raisonnement, les enfants sont capables de détecter qu'ils se trouvaient face à un piège ou un conflit, et ils ont conscience qu'ils n'ont pas donné la réponse attendue (De Neys et al., 2014). Ce qui est intéressant dans ce phénomène, c'est le fait que les enfants, aussi bien que les adultes, détectent le conflit sans pour autant être capables de donner la bonne réponse. Ceci prouve que l'inhibition joue un rôle tout particulier, puisque même en détectant le conflit, les participants ne parviennent pas à bloquer l'heuristique. Pour être alors efficace pendant une tâche

de raisonnement, il faut non seulement détecter le conflit mais également bloquer le *Système 1* pour activer le *Système 2* à l'aide du *Système 3*. Une des clefs pour éviter les pièges pourrait être de mettre en place un entraînement au contrôle inhibiteur afin de perfectionner les capacités inhibitrices, et donc de bloquer les heuristiques, chez les enfants et chez les adultes.

Il existe également des paradoxes au cours du développement cognitif dans plusieurs domaines, qui peuvent être le reflet d'un défaut d'inhibition d'une heuristique trompeuse dont la fréquence d'usage est importante et qui surpasse l'algorithme logique qui permet de résoudre la tâche. C'est le cas par exemple dans le domaine du nombre. Dans la tâche de conservation du nombre de Jean Piaget, les enfants ne doivent pas se faire piéger par l'heuristique visuelle 'longueur égal nombre'. Cette heuristique se construit progressivement et de manière répétée dans l'environnement visuel de l'enfant. C'est le cas notamment en classe lorsque les enfants apprennent à compter, et dans les manuels scolaires pour apprendre le dénombrement qui présentent des alignements d'objets ou d'animaux en nombre et de longueurs croissantes (cf. Figure 9). Puisque, en effet, une ligne comprenant dix pingouins et plus longue qu'une ligne comprenant deux crocodiles. Par conséquent, cette illustration renforce implicitement la relation entre la longueur et le nombre.



**Figure 9 :** Exemple d'illustration dans un livre pédagogique utilisée pour apprendre à compter aux enfants.

Il semblerait donc que les capacités d'inhibition soient indispensables pour réussir cette tâche piagétienne. C'est le but de cette étude en IRMf (Houdé et al., 2011) : vérifier l'implication de l'inhibition dans la réussite de la tâche de conservation du nombre. Pour cela, les chercheurs ont comparé les performances à la tâche de conservation d'un groupe de 60 enfants âgés de 5 à 11 ans. Les résultats démontrent que les régions cérébrales activées sont différentes entre les enfants qui réussissent la tâche et ceux qui ne la réussissent pas. La réussite de la tâche dépend donc de l'activation d'un réseau fronto-pariétal comprenant le cortex pariétal et le gyrus frontal inférieur droit, connus pour être impliqués dans l'inhibition de la réponse (Aron et al., 2004). À la suite de ces résultats, une autre étude complémentaire a été réalisée afin de caractériser le rôle de ces deux régions dans ce réseau fronto-pariétal (Poirel et al., 2012). Pour cela les auteurs se sont intéressés à la relation entre le signal BOLD (i.e. *blood oxygen level dependent signal*) dans les régions de ce réseau et les performances à deux tâches cognitives de ces mêmes enfants. Ces deux tâches cognitives utilisées sont une tâche de Stroop adaptée à l'enfant (Wright et al., 2003) et une tâche de mémoire de travail (empan envers). Dans la tâche de Stroop adaptée, les enfants doivent dénommer l'animal présenté en se basant sur son corps. Pour les items congruents la tête de l'animal correspond au corps (e.g. une tête de canard sur un corps de canard) et pour les items incongruents la tête de l'animal ne correspond pas au corps (e.g. une tête de cochon sur un corps de canard). Ceci permet de reproduire parfaitement l'effet d'interférence propre à la tâche classique du Stroop, et de le mesurer chez de jeunes enfants. Les résultats démontrent que, seulement chez les enfants conservants, les performances à la tâche de Stroop adaptée expliquent 38% de la variance du signal BOLD au niveau du gyrus frontal inférieur droit. D'un autre côté, les résultats montrent que les performances à la tâche de mémoire de travail expliquent 30% de la variance du signal BOLD au niveau du sillon intra-pariétal gauche. Ceci confirme l'implication des capacités d'inhibition pour réussir la tâche de conservation du nombre piagétienne, donc ici d'inhiber l'heuristique 'longueur égal nombre'.

Dans le domaine de la catégorisation logique, il existe également un défaut d'inhibition, qui serait le reflet d'erreurs commises par les enfants à la tâche de quantification de l'inclusion piagétienne (pour rappel de la tâche cf. l. a. Modèle piagétien). Dans une étude comportementale

comparant des enfants à des adultes (Borst et al., 2013), les chercheurs ont démontré que, pendant une tâche de quantification, (1) les adultes sont plus rapides que les enfants pour donner leurs réponses, et (2) les enfants, ainsi que les adultes, mettent plus de temps à répondre correctement aux items pour lesquels ils doivent comparer les deux sous-classes A et A', seulement quand pour l'item précédent la comparaison se fait aux niveaux des classes A et B. Cet effet d'amorçage négatif confirme que, pour cette tâche, il est effectivement nécessaire de mettre en jeu les capacités d'inhibition, et ce, même à l'âge adulte. L'inhibition des biais cognitifs et perceptifs de notre enfance est donc toujours nécessaire à l'âge adulte (Epley et al., 2004; Diamond & Kirkham, 2005). L'efficacité à la tâche de quantification piagétienne augmente avec l'âge et avec la capacité à inhiber une heuristique fréquente mais trompeuse, donc ici la comparaison de deux sous-classes.

Pour conclure, ces différentes découvertes confirment le fait que le développement exécutif suit une trajectoire dynamique et non-linéaire, voire que l'on peut qualifier de 'biscornue' (p.18 de O. Houdé, La psychologie de l'enfant, Paris, Puf, 2004 [2ème éd. 2007]). Elles confirment également le fait qu'il existe différentes trajectoires selon le domaine cognitif et selon l'âge de l'enfant. Au cours du développement, les compétences apparaissent et disparaissent, mais les nouvelles compétences peuvent également entrer en conflit avec celles déjà acquises. De plus, le contrôle inhibiteur joue un rôle primordial dans le développement cognitif, de par la nécessité du *Système 3*, reflet de l'inhibition, pour réussir les tâches de raisonnement et ce, même jusqu'à l'âge adulte. Ceci est particulièrement vrai dans les tâches piagésiennes pour les enfants. En effet, le principe de base de ces tâches est d'inhiber les heuristiques sur-apprises et très fréquentes, mais surtout trompeuses. Selon Jean Piaget, l'intelligence est la capacité de construire et d'activer de nouvelles stratégies. Néanmoins, il faut désormais compléter cette définition en y ajoutant la capacité de l'intelligence à apprendre à inhiber les pièges (i.e. les heuristiques). Par conséquent, ceci place les capacités inhibitrices au cœur du développement cognitif de l'enfant. Il est également nécessaire de prendre en compte l'influence fondamentale de la génétique, de l'organisation cérébrale anatomique ainsi que fonctionnelle et de l'interaction avec l'environnement.

## II. Efficience du contrôle inhibiteur et apprentissages scolaires

Comme déjà abordé précédemment les fonctions exécutives, et tout particulièrement le contrôle inhibiteur, tiennent une place centrale dans des domaines nombreux et variés. Notamment, et de manière logique, ces processus exécutifs jouent un rôle dans le fonctionnement cognitif, le contrôle comportemental et les interactions sociales. De manière plus surprenante, ils jouent également un rôle de prédicteur dans la réussite scolaire et professionnelle (Denis, 1989; Blair & Razza, 2007; Carlson & Moses, 2013; Kim et al., 2013) mais également dans la santé mentale et physique, ou encore la richesse et la qualité de vie (Moffitt et al., 2011; Reinert, Po'e, & Barkin, 2013; Bull & Lee, 2014; Cragg & Gilmore, 2014; Liang et al., 2014). En effet, une étude longitudinale a démontré l'aspect prédicteur des capacités inhibitrices sur les performances aux apprentissages scolaires (Moffitt et al., 2011). Les résultats confirment que les performances inhibitrices des enfants âgés entre 3 et 11 ans prédisent, 30 ans après, la qualité de la santé mentale et physique, le salaire ainsi que la joie de vivre. Il a également été montré que, comparé au statut socio-économique ou encore au quotient intellectuel, les performances du contrôle inhibiteur sont un meilleur prédicteur de la réussite scolaire (Moffitt et al., 2011). Une autre étude longitudinale explique que les capacités cognitives à l'âge de 2 ans sont des prédicteurs significatifs et relativement forts des compétences en mathématiques chez ces mêmes enfants à l'âge de 5 ans (Mulder et al., 2017). Une autre étude encore souligne que, en plus d'être un prédicteur unique de réussite en mathématiques et en lecture, des performances élevées aux fonctions exécutives peuvent aider à compenser les faibles niveaux de compétences académiques en maternelle (Ribner et al., 2017). Ces différents articles attirent l'attention sur le fait que les fonctions exécutives sont essentielles à la réussite scolaire. Ce lien est déjà évident à l'âge préscolaire lorsque les fonctions exécutives prédisent des compétences, par exemple en mathématiques. En outre, plus tard dans le développement, la mémoire de travail, l'inhibition et la flexibilité cognitive sont tous des prédicteurs des facilités et des difficultés dans le domaine des mathématiques, de la lecture et de l'orthographe (Dekker et al., 2017; von Suchodoletz et al., 2017; Daucourt et al., 2018). La valeur prédictive des fonctions exécutives concernant la réussite scolaire semble être robuste pour contrer les effets du statut socioéconomique, de la langue

maternelle, etc., ainsi que des différences nationales dans les systèmes scolaires (Huizinga et al., 2018).

Par conséquent, plusieurs études expérimentales ont tenté de rendre compte de l'implication des processus cognitifs dans les apprentissages scolaires, tels que les capacités arithmétiques et de grammaire. En effet, résoudre des problèmes arithmétiques est une capacité majeure que les enfants doivent acquérir pendant l'école primaire. Mais ces problèmes arithmétiques les mettent aussi parfois en grande difficulté, d'où l'intérêt de mieux comprendre l'implication des processus cognitifs dans cet apprentissage scolaire phare. La difficulté qu'ont les enfants réside dans la résolution de problèmes dans lesquels l'énoncé interfère avec l'opération arithmétique à réaliser pour trouver la bonne réponse (Giroux & Ste-Marie, 2001; Schumacher & Fuchs, 2012). Par exemple, les enfants commettent plus d'erreurs face à ce type de problème incongruent : « Jean a 15 billes. Il en a 5 de plus que Marie. Combien Marie a-t-elle de billes ? », que face au type de problème congruent : « Jean a 15 billes. Marie en a 5 de plus que lui. Combien Marie a-t-elle de billes ? ». Les enfants commettent plus d'erreurs face au premier type de problème puisqu'ils doivent effectuer une soustraction alors que l'énoncé comporte la locution "plus que", termes généralement associés à une addition. Ceci se confirme dans les erreurs des enfants qui, justement, pour ce même exemple répondent que 'Marie a 20 billes', reflétant bien une erreur d'addition et donc un défaut d'inhibition induit par l'énoncé. Dans un paradigme de négative priming, les chercheurs ont utilisé ces deux types de problèmes arithmétiques chez des enfants (moyenne d'âge :  $11,7 \pm 0,4$  ans), des adolescents (moyenne d'âge :  $14,7 \pm 0,4$  ans) et des adultes (moyenne d'âge :  $24,7 \pm 5$  ans) (Lubin et al., 2013). Les résultats démontrent que les adultes font moins d'erreurs que les enfants et les adolescents pour résoudre les problèmes incongruents. De plus, le temps de réponse requis pour résoudre les problèmes congruents précédés par des problèmes incongruents est plus long que dans la condition contrôle, où un problème neutre est présenté avant un problème congruent. Ces résultats montrent que la résolution de problèmes arithmétiques incongruents implique, à tous les âges, d'inhiber l'heuristique induite par l'énoncé, c'est-à-dire de faire une addition quand l'énoncé contient "plus que" ou une soustraction quand il contient "moins que". La capacité d'inhiber cette heuristique

devient plus efficiente avec l'âge, par conséquent elle permet aux adultes de faire moins d'erreurs. En conclusion, cette heuristique induite par la forme de l'énoncé se construit et se renforce sûrement dans les apprentissages scolaires précédents. Ceci crée une preuve tangible que, d'un point de vue pédagogique, les enfants avec des difficultés face aux problèmes arithmétiques n'ont pas forcément de déficit en mathématiques mais plutôt qu'ils présentent un défaut d'inhibition. Cette étude implique donc de créer une approche pédagogique totalement différente, qui consisterait à réaliser un apprentissage à l'inhibition de l'heuristique trompeuse induite par l'énoncé et pas seulement un apprentissage des opérations mathématiques. Une étude complémentaire a été réalisée avec le même paradigme, mais cette fois chez des experts en mathématiques (i.e. étudiants en master de mathématiques) (Lubin et al., 2016). Les résultats montrent les mêmes effets que dans l'étude précédente (cf. Lubin et al., 2013), avec cependant un effet plus faible chez les experts en comparaison aux non-experts (i.e. étudiants en master de sciences humaines, excepté ceux en psychologie). L'étude confirme que même les experts en mathématiques doivent inhiber l'heuristique induite par l'énoncé. Dans une deuxième partie d'étude, les chercheurs ont également fait passer deux tâches cognitives supplémentaires aux participants : les matrices de RAVEN et une tâche de Stroop classique. Les résultats ne démontrent aucune différence de performance dans les deux tâches et entre les deux groupes (i.e. experts versus non-experts). Ce résultat confirme que les experts en mathématiques sont meilleurs face aux problèmes arithmétiques que les non-experts sans pour autant posséder de meilleures capacités d'intelligence fluide ou d'inhibition. Ceci reflète leur capacité à inhiber l'heuristique trompeuse induite par l'énoncé. D'autres études se sont centrées sur l'implication des processus cognitifs dans les capacités de grammaire, autre apprentissage phare. En effet, l'un des objectifs principaux des programmes scolaires durant l'école primaire est d'apprendre aux enfants à écrire, ce qui inclut également de connaître les règles de grammaire. Cependant, les enfants comme les adultes continuent de faire des erreurs grammaticales. Par exemple, ces erreurs se produisent face à un certain type de phrase telle que : "Je les manges" qui est considéré comme correctement conjugué, alors qu'en réalité la bonne conjugaison est : "Je les mange". Si la première phrase est considérée à tort comme correcte, c'est à cause de la présence du pronom pluriel "les" qui induit

de mettre au pluriel, donc d'ajouter un *-s*, au mot suivant. Cependant cette règle ne s'applique pas ici puisque le mot suivant est un verbe. Il ne faut donc pas le mettre au pluriel mais l'accorder avec le pronom personnel "je". Dans cet exemple, il faut donc inhiber cette règle sur-apprise qui dicte de mettre automatiquement au pluriel le mot qui suit le déterminant "les". Dans une étude utilisant un paradigme de négative priming (Lanoë et al., 2016) chez des enfants (moyenne d'âge : 11,7 ± 0,7 ans), des adolescents (moyenne d'âge : 14,1 ± 0,6 ans) et des adultes (moyenne d'âge : 24,1 ± 2,5 ans), les chercheurs ont créé une tâche de grammaire dans laquelle deux phrases sont présentées aux participants et ceux-ci doivent sélectionner celle qui est correctement conjuguée. Dans cette tâche il existe trois types d'items : (1) les items incongruents, pour lesquels les participants doivent par exemple choisir entre les deux phrases suivantes : "Je les manges" versus "Je les mange", (2) les items congruents, par exemple : "Je la manges" versus "Je la mange", et enfin (3) les items contrôle, par exemple : "Je mange les bonbon" versus "Je mange les bonbons". Les résultats démontrent que, comparés aux enfants, les adultes et les adolescents répondent plus rapidement aux items incongruents, mais aussi qu'à tout âge, les participants mettent plus de temps à répondre aux items congruents quand ils sont précédés d'items incongruents, prouvant le coût cognitif nécessaire pour inhiber la règle du pluriel. Cette étude confirme l'implication des capacités d'inhibition dans l'application des règles de grammaire. Par conséquent, à nouveau, une approche pédagogique alternative pourrait inclure un apprentissage à l'inhibition de cette heuristique automatisée en plus de l'apprentissage classique des règles de grammaire. À la suite de ces résultats, une question persiste : les erreurs résultent-elles principalement d'un défaut d'inhibition ou également d'une incapacité à détecter que la stratégie utilisée est erronée ? Pour y répondre, des chercheurs ont réutilisé la tâche grammaticale décrite plus haut (cf. Lanoë et al., 2016) chez des enfants et des adolescents en y ajoutant une échelle de Likert (e.g. de 0 : pas du tout sûr à 4 : tout à fait sûr), permettant aux participants d'indiquer leur niveau de confiance en leurs réponses (Lanoë et al., 2017). Les résultats démontrent que les adolescents et les enfants commettent plus d'erreurs aux items incongruents qu'aux items congruents, mais aussi que les adolescents montrent une nette diminution de confiance en leurs réponses après avoir commis une erreur dans la tâche grammaticale, ce qui n'est pas le cas des enfants. Cela indique donc que,

bien que les enfants ne semblent pas détecter leurs erreurs, les adolescents, eux, détectent au moins le conflit sans pour autant donner la bonne réponse.

Toutes ces études sont la preuve que le contrôle inhibiteur représente un processus clef au cours du développement cognitif jusqu'à l'âge adulte (où les erreurs persistent), et plus particulièrement dans la mise en place des apprentissages scolaires. Notamment grâce aux études menées, des outils, issus directement des résultats de la recherche, sont maintenant à disposition des professeurs des écoles afin de gérer des éventuelles difficultés en classe. En effet, il a été prouvé que les réponses intuitives (plus souvent fausses que vraies) apparaissent beaucoup plus rapidement que la réponse 'réfléchie' (Diamond, 2013). Les enfants qui continuent à commettre les mêmes erreurs ont donc tendance à être considérés comme de mauvais élèves. En réalité, ce n'est pas parce qu'ils ne connaissent pas la bonne réponse, mais parce qu'ils ne parviennent pas à bloquer la réponse rapide et erronée qui semble logique (Brault Foisy et al., 2015). L'un de ces outils est une illustration réalisée avec l'aide d'un enfant de 12 ans qui permet de mieux comprendre le principe du contrôle inhibiteur et d'expliquer comment il fonctionne aux autres enfants (Brault Foisy et al., 2015). L'illustration représente l'image d'une course de vitesse entre une tortue et un lièvre que l'on peut expliquer comme ceci aux enfants : Capitaine Inhibition stoppe l'Heuristique pour permettre aux Algorithmes de donner la bonne réponse. Un autre outil, appelé l'attrape piège, peut être directement utilisé en classe. L'idée ici est de mettre dans la partie hachurée du piège la réponse rapide, c'est-à-dire la mauvaise réponse, pour pouvoir ensuite placer au centre la bonne réponse (O. Houdé, Apprendre à résister, Paris, Le Pommier, 2014). Apprendre à inhiber ces erreurs est donc une manière prometteuse d'aider les enfants à surmonter les difficultés à l'école et à penser plus logiquement face aux problèmes de la vie quotidienne.

### **III. Conclusion**

La vision du développement cognitif chez l'enfant a radicalement changé depuis ces dernières années, grâce à l'émergence du courant post-piagétien mais également grâce à l'apparition de nouvelles technologies telles que l'IRM et donc du courant neuroconstructiviste. Ceci a donné naissance à un nouveau champ de discipline : les neurosciences cognitives développementales. Ce dernier est donc 'jeune' et il reste encore énormément à comprendre et à découvrir. Par ailleurs, il n'est plus à prouver que le contrôle inhibiteur joue un rôle primordial tout au long du développement et même jusqu'à l'âge adulte, mais également dans la mise en place des apprentissages scolaires. On peut donc se poser la question suivante : que se passerait-il si les capacités inhibitrices étaient entraînées, comme on peut s'entraîner à un sport ou se rééduquer suite à une lésion ?

## **CHAPITRE III :**

### **Entraînements des fonctions exécutives**

---

#### **I. Travaux précurseurs des effets de l'entraînement**

Il existe un grand nombre d'études analysant les effets de l'entraînement. L'une des pionnières est celle de Eleanor A. Maguire et son équipe (Maguire et al., 2000). Dans cette étude, les chercheurs ont comparé un groupe de conducteurs de taxis londoniens à un groupe semblable contrôle, à l'aide de l'IRMa. Ils ont trouvé une organisation cérébrale différente entre ces deux groupes, c'est-à-dire des différences dans la structure spécifique aux hippocampes. En comparaison au groupe contrôle, les conducteurs de taxis ont un volume significativement plus élevé de matière grise dans la partie postérieure de l'hippocampe. Les chercheurs expliquent ces différences du fait de la complexité des rues de Londres, ainsi que de l'examen à passer pour obtenir une licence. Un autre point très intéressant est que les chercheurs ont trouvé une corrélation entre les changements corticaux observés, du fait de leur métier, avec le nombre d'années d'expérience. Plus précisément, le volume de l'hippocampe droit corrèle positivement avec le temps passé à exercer cette profession. La plasticité cérébrale est donc reliée directement au type d'activité mais également au temps passé à exercer cette même activité. Les auteurs en concluent que des changements corticaux, tels que le volume de matière grise, peuvent être induits suite à une activité 'normale'.

Effectivement, plusieurs études ont démontré que la pratique musicale est associée à une performance supérieure dans diverses tâches exécutives. Les chercheurs décrivent ce phénomène comme 'l'avantage du musicien' (pour revue voir : Putkinen & Saarikivi, 2018). En comparant les performances à des tests cognitifs évaluant l'inhibition et la flexibilité cognitive chez 90 enfants âgés entre 9-15 ans, ils constatent que les enfants musiciens surpassent les enfants non-musiciens dans les deux tâches, et ce, quel que soit leur âge (Korkman, 2008; Saarikivi et al., 2016). Ces

différences comportementales sont associées à des différences dans la structure et le fonctionnement cérébraux entre des adultes musiciens et non-musiciens, plus précisément dans des aires cérébrales impliquées dans la pratique musicale telles que les aires auditives ou sensorimotrices (Gaab & Schlaug, 2003; Gaser & Schlaug, 2003 & 2006; Bermudez & Zatorre, 2005; Bangert & Schlaug, 2006; Zatorre et al., 2007). De la même manière, plusieurs études ont démontré que les personnes bilingues présentaient de meilleures capacités cognitives que les non-bilingues (Bialystok, 2017; Lehtonen et al., 2018; Putkinen & Saarikivi, 2018). L'une de ces études a révélé que les bilingues engageaient moins le cortex cingulaire antérieur que les monolingues lors d'une tâche de Flanker, suggérant des capacités d'inhibition et un traitement des conflits plus efficaces chez les bilingues que chez les monolingues. Cette découverte a été retrouvée dans une étude en IRMf plus récente qui a montré que les bilingues présentaient moins d'activation au niveau du cortex cingulaire antérieur lors de la tâche de stop-signal (Abutalebi et al., 2012; Rodríguez-Pujadas et al., 2014).

En réponse à ces études, l'équipe de Bogdan Draganski s'est posé la question suivante : la structure du cerveau humain adulte se modifie-t-elle en réponse aux exigences environnementales ? Pour tenter d'y répondre, ils ont sélectionné 24 jeunes adultes (moyenne d'âge :  $22 \pm 1,6$  ans) pour leur apprendre à jongler (Draganski et al., 2004). Tous les participants ont passé trois IRM à trois temps différents : avant d'apprendre à jongler, dans les trois mois qui suivent c'est-à-dire quand ils étaient capables de jongler pendant 60 secondes consécutives et enfin, trois mois après le deuxième scan sans pratiquer de jonglage. Concernant le premier scan (i.e. *baseline* en anglais), il n'y avait aucune différence cérébrale entre le groupe de jongleur et le groupe contrôle. En revanche, au moment du deuxième scan, les jongleurs présentaient une expansion de matière grise au niveau du temporal moyen en bilatéral et du sillon intra-pariétal postérieur gauche comparé au premier scan. Cette augmentation diminue au moment du troisième et dernier scan. Ces changements structuraux sont étroitement liés aux performances de jonglages. Cette étude contredit l'opinion générale selon laquelle la structure anatomique du cerveau humain adulte ne change pas, à l'exception des changements de morphologie causés par le vieillissement ou les conditions pathologiques. Les résultats prouvent également que la

plasticité cérébrale induite par l'apprentissage se reflète également au niveau structural du cerveau humain.

Cette même équipe a continué ses travaux sur la plasticité cérébrale en se demandant si un apprentissage sur les connaissances, appelées 'abstraites' dans l'article, impliquerait les mêmes changements cérébraux anatomiques qu'un apprentissage moteur. Pour tester cette hypothèse, ils ont analysé des étudiants allemands inscrits en médecine pendant leur période d'examens (Draganski et al., 2006). Ils ont repris le même format que l'étude précédente avec trois scans IRM à trois temps différents : en prétest, en posttest immédiat et en posttest différé. Encore une fois, il n'y a pas de différence cérébrale entre les participants au moment du premier scan. Ensuite les résultats démontrent une augmentation du volume de matière grise au niveau du cortex pariétal postérieur et de la partie inférieure en bilatéral. Ils observent également une augmentation du volume de matière grise continue entre les trois temps de l'étude au niveau des hippocampes postérieurs. Les chercheurs en concluent que la plasticité cérébrale est une caractéristique du système nerveux qui a évolué pour faire face aux changements de l'environnement. Ils mettent également en évidence que comprendre les changements dans la structure anatomique du cerveau résultant de l'apprentissage et de l'adaptation est essentiel pour comprendre la capacité de notre cerveau à s'adapter.

L'une des grandes découvertes de ces études princeps est que la plasticité cérébrale au niveau structural du cerveau existe toujours même à l'âge adulte, mais aussi chez les personnes âgées (Buschkuhl et al., 2008; Li et al., 2008; Karbach et al., 2010; Schmiedek et al., 2010; Zinke et al., 2012 & 2014; Borella et al., 2017). Elles mettent également en lumière le fait que le cerveau humain est un organe très structuré anatomiquement mais aussi très plastique et réceptif à l'apprentissage (Posner & Rothbart, 2005).

Il existe par conséquent des études réalisées chez l'enfant du fait que c'est à cette période de la vie que la plasticité cérébrale reste la plus forte. Une étude a comparé deux groupes d'enfants ayant suivi un apprentissage musical de 15 mois (Hyde et al., 2009). Le but de cette étude est de relier les changements cérébraux aux changements comportementaux. Le choix de

l'entraînement n'est pas anodin non plus du fait que l'apprentissage de la musique instrumentale est une expérience intense, multi sensorielle et motrice qui offre une opportunité idéale pour étudier la plasticité cérébrale. Cette étude suit le même protocole que les études décrites plus haut, c'est-à-dire deux scans IRM : un premier en prétest et un deuxième en posttest immédiat. Les résultats montrent des changements structuraux dans les aires motrices et auditives, qui sont corrélés avec les performances comportementales. Une autre étude encore (Diamond & Lee, 2011; Diamond, 2012) démontre que plusieurs activités permettent d'améliorer les performances aux fonctions exécutives comme : un entraînement informatisé, des jeux non informatisés, de l'aérobic, des arts martiaux, du yoga, de la méditation (i.e. *mindfulness* en anglais) et des programmes scolaires adaptés.

Grâce à ces multiples études, on sait que tous les programmes qui présentent des résultats probants sont des programmes qui impliquent un entraînement, répété avec une difficulté adaptée à l'enfant et surtout croissante tout au long de la période d'apprentissage. En effet, la difficulté croissante est indispensable pour empêcher l'automatisation des processus cognitifs, et également empêcher la mise en place de stratégies (Green & Bavelier, 2008; Klingberg, 2010; Enriquez-Geppert et al., 2013). Pour que l'entraînement soit efficace, les capacités cognitives doivent être challengées tout au long de la durée de l'apprentissage. Ceci fonctionne exactement comme pour un programme d'entraînement sportif pour lequel l'intensité ou la répétition d'un mouvement sont augmentées à chaque séance afin de progresser (Diamond & Lee, 2011; Diamond & Ling, 2016). Le deuxième point à prendre en compte est la durée et la fréquence de l'entraînement. Plus l'entraînement est long avec une fréquence répétée, plus les résultats sont forts aussi bien au niveau comportemental que cérébral (Diamond & Ling, 2016; Chavan et al., 2017), même s'il est vrai qu'un unique entraînement de quelques minutes seulement chez l'adulte peut induire une amélioration de performance et un changement au niveau cérébral fonctionnel (Houdé et al., 2000). Le troisième point à prendre en compte est la motivation des participants. En effet, leur implication et leur désir de s'améliorer doivent être présents tout au long de la durée de l'entraînement (Green & Bavelier, 2008). Si les tâches utilisées durant l'apprentissage sont considérées comme ennuyeuses ou répétitives par les participants, cela aura des effets négatifs

sur les résultats. De la même manière, si les participants n'ont pas de retours (i.e. *feedbacks*) ou de récompenses selon leurs performances, cela influencera leur motivation et donc leur performance. Et enfin, le dernier point à prendre en compte dans la mesure de l'effet d'un entraînement doit être le fait de comparer le groupe suivant un entraînement à un groupe contrôle ou témoin (Jolles et al., 2010; Wujcik et al., 2017) et tout particulièrement en comparant à un groupe de contrôle actif qui suit un entraînement. Par exemple il est possible de proposer aux participants du groupe contrôle de répondre à des questions de culture générale de type Incollables®. Dans ce cas, les participants du groupe contrôle ainsi que ceux du groupe suivant l'entraînement sont face aux mêmes attentes et donc à la même motivation (Diamong & Ling, 2016).

Malgré ce que l'on sait pour l'instant grâce aux différentes études, il manque cependant toujours une étude de l'effet de l'entraînement cognitif 'pur' chez l'enfant (Karbach & Unger, 2014; Karbach et al., 2017; Wiebe & Karbach 2017), parce que les résultats de ce type d'étude permettraient de pouvoir être capable de fournir des interventions (i.e. des entraînements) qui seraient désignées pour compenser des déficits exécutifs liés au développement et au déclin cognitif dû au vieillissement.

## **II. Les effets de transfert dans les études de l'entraînement des fonctions exécutives**

Un autre point fondamental dans les études sur les effets de l'entraînement et/ou de l'apprentissage est l'effet de transfert. Ce dernier permet de mesurer le bénéfice, plus ou moins étendu, des effets de l'apprentissage. Les effets de transfert sont une généralisation des améliorations des performances au(x) tâche(s) entraînée(s) à d'autres tâches non-entraînées. Il existe différents types de transfert : le transfert proche et le transfert lointain. Concernant le transfert proche, il correspond au transfert des compétences acquises au(x) tâche(s) entraînée(s) à des tâches non-entraînées mais reprenant des caractéristiques ou impliquant des fonctions

exécutives communes (Jonides et al., 2004). En d'autres termes pour qu'il y ait transfert proche, la tâche entraînée ainsi que la tâche de comparaison doivent avoir les mêmes caractéristiques, c'est-à-dire par exemple : un format identique (e.g. même boutons réponse) (Swanson et al., 2018) mais également recrutant les mêmes fonctions exécutives, par exemple un entraînement au contrôle inhibiteur induira un transfert à d'autres tâches d'inhibition non-entraînées. Le transfert lointain correspond au transfert des compétences acquises au(x) tâche(s) entraînée(s) à des tâches non-entraînées ne présentant aucune similarité et évaluant des fonctions exécutives différentes. Par exemple, en suivant un entraînement à la mémoire de travail les participants démontraient également un gain de performances à des tâches d'inhibition.

Dans la littérature, il existe un réel désaccord sur les effets de transfert suite à un entraînement, et ce, quels que soient la population étudiée ou l'entraînement suivi (Jaeggi et al., 2008; Karbach & Kray, 2009; Thorell et al., 2009; Berkman et al., 2014; Karbach & Unger, 2014; Au et al., 2015; Liu et al., 2015; Traverso et al., 2015; Wilkinson et al., 2015; Homer et al., 2017; Souders et al., 2017). Nous allons vous présenter par la suite plusieurs études permettant d'illustrer ces désaccords, tout en privilégiant des études sur les effets de l'entraînement des fonctions exécutives.

Pour commencer, une étude chez de jeunes adultes (moyenne d'âge :  $25,6 \pm 3,3$  ans) ayant suivi un entraînement à la mémoire de travail et plus précisément à la tâche de *n-back*, a démontré un transfert proche. En effet, comparé au groupe contrôle, les membres du groupe ayant suivi l'entraînement améliorent leurs performances à la tâche entraînée, mais améliorent également leurs performances au test d'intelligence fluide montrant un transfert lointain (Jaeggi et al., 2008). Ce résultat a été retrouvé dans une méta-analyse, confirmant qu'un entraînement à la mémoire de travail engendre un transfert sur les capacités d'intelligence fluide (Au et al., 2015). Dans une autre étude comparant trois groupes d'âges distincts : un groupe d'enfants âgés entre 8-10 ans, un groupe de jeunes adultes âgés de 18-26 ans et un groupe de personnes âgées entre 62 et 76 ans, les chercheurs ont constaté un transfert important vers d'autres tâches exécutives et une amélioration des performances de l'intelligence fluide pour tous les groupes d'âge, ce qui indique un transfert relativement général des capacités exécutives après l'entraînement (Karbach & Kray,

2009). Dans une étude réalisée chez des enfants tout-venants âgés entre 4 et 5 ans, les chercheurs ont comparé l'effet de différents types d'entraînements : (1) un groupe suivant un entraînement à la mémoire de travail (e.g. Cogmed®), (2) un groupe suivant un entraînement au contrôle inhibiteur (i.e. go/no-go, stop-signal et une tâche de Flanker) comparés à deux groupes contrôle : (3) un groupe contrôle passif ne suivant aucun entraînement (Thorell et al., 2009). Les enfants ayant suivi l'entraînement à la mémoire de travail améliorent significativement leurs performances aux tâches entraînées, mais on observe également des effets de transfert proche sur les performances de mémoire de travail spatiale et verbale, ainsi que des effets de transfert sur l'attention. Les enfants ayant suivi en entraînement au contrôle inhibiteur ont montré une amélioration significative sur deux des trois tâches entraînées, mais aucune amélioration significative par rapport aux deux groupes contrôle sur les tâches mesurant la mémoire de travail ou l'attention. Les auteurs en concluent qu'entraîner le contrôle inhibiteur est beaucoup plus compliqué que d'entraîner la mémoire de travail. En effet, dans des paradigmes utilisés comme la tâche de go/no-go ou de stop-signal, les capacités inhibitrices ne sont pas continuellement stimulées au cours de la tâche mais seulement pour les items no-go ou stop (représentant une minorité des essais totaux). Cependant, dans une étude en IRMf réalisée chez des jeunes adultes (18-30 ans) ayant suivi un entraînement (i.e. 10 sessions sur 3 semaines) à la tâche de stop-signal ou non (i.e. groupe contrôle : tâche de stop-signal sans items stop), les résultats ont démontré une amélioration comportementale (i.e. de performance) à la tâche entraînée mais également un changement d'activation cérébrale au niveau du gyrus frontal inférieur droit et du cortex préfrontal dorsolatéral (Berkman et al., 2014). Plus précisément, après l'entraînement l'activation cérébrale augmente au niveau du gyrus frontal inférieur droit et diminue au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral. Ces résultats sont les premiers à mettre en lumière les voies neuronales des améliorations du contrôle inhibiteur liées à l'entraînement et ils peuvent expliquer les résultats nuls antérieurs du transfert suite à un entraînement au contrôle inhibiteur. Du fait que les capacités inhibitrices se développent rapidement pendant la période préscolaire et qu'elles sont importantes pour le développement cognitif, il est primordial de déterminer les effets de

l'entraînement au contrôle inhibiteur et de transfert chez les jeunes enfants. Pour cela, une étude a comparé un groupe d'enfants d'âge préscolaire (moyenne d'âge :  $4.87 \pm 0.26$  ans) ayant suivi un entraînement au jeu vidéo Fruit Ninja® (développé par Halfbrick Studios) à un groupe contrôle (moyenne d'âge :  $4.88 \pm 0.20$  ans) (Liu et al., 2015). Le but de ce jeu vidéo est de trancher le plus de fruits possible tout en évitant les bombes. Quand un fruit est tranché un point s'ajoute au score, mais quand une bombe est touchée ou que trois fruits ne sont pas tranchés le jeu s'arrête. Les auteurs considèrent Fruit Ninja® comme une tâche de go/no-go, où les fruits représentent les items go et les bombes les items no-go. Les enfants ont suivi 4 entraînements de 15 minutes par semaine pendant 3 semaines (i.e. 12 sessions). Entre le prétest et le posttest, les résultats démontrent, uniquement chez les enfants du groupe entraîné, une amélioration significative des performances au jeu Fruit Ninja®, et également un effet de transfert lointain sur les capacités de raisonnement (non-significatif). Ce résultat prouve que les capacités exécutives peuvent être entraînées et se généraliser dès l'âge préscolaire. D'autres chercheurs ont évalué l'effet d'un entraînement (i.e. 12 sessions de 30 minutes 3 fois/semaine pendant un mois) reposant sur plusieurs composantes exécutives (i.e. la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive) chez des enfants tout-venants âgés de 5 ans (Traverso et al., 2015). Les résultats indiquent que les enfants ayant participé à l'entraînement ont surpassé les enfants du groupe contrôle dans des tâches exécutives simples et plus complexes. Plus précisément, ces enfants ont montré des capacités accrues pour retarder la gratification (i.e. à la tâche de gratification différée), contrôler les réponses continues, traiter et mettre à jour les informations et gérer les conflits cognitifs élevés. Ceci suggère que l'amélioration des fonctions exécutives est possible même à l'âge préscolaire. Une autre étude a proposé un entraînement de 6 sessions de 30 minutes pendant 3 semaines, reposant sur plusieurs composantes exécutives (i.e. tâche de Local-Global, de *n-back* et de go/no-go) à des personnes âgées (60-88 ans) (Wilkinson et al., 2015). Les performances des participants aux trois tâches cognitives ont montré une amélioration significative au cours des séances de pratique, suggérant une plasticité induite par l'entraînement. Les résultats cependant, ne sont pas concluants en ce qui concerne les effets des transferts proches et lointains. Dans une étude, des chercheurs ont tenté de comparer les effets d'un

entraînement à la mémoire de travail versus un entraînement au contrôle inhibiteur versus deux groupes contrôles (actif et passif) chez des jeunes adultes âgés entre 18-30 ans (Maraver et al., 2016). Les groupes ont suivi un entraînement de 6 sessions au total réparties en 3 sessions par semaine pendant 2 semaines. En ce qui concerne les effets de transfert, les résultats ont montré des schémas spécifiques d'effets de transfert proche en fonction du type d'entraînement. Ils ont mis en évidence que seul le groupe d'entraînement au contrôle inhibiteur a montré un effet de transfert lointain sur les performances de raisonnement. Enfin, tous les participants ayant suivi un entraînement au contrôle inhibiteur utilisent leurs capacités inhibitrices de manière plus proactive au moment du posttest. Un autre résultat important suite à l'entraînement, est que les participants motivés et suivant un entraînement ont atteint des niveaux plus élevés de performance au cours de l'expérience. Dans une autre étude encore les chercheurs ont fait suivre un entraînement journalier à la tâche de go/no-go de 20 minutes pendant 20 semaines (Zhao et al., 2016) à des enfants âgés entre 10 et 12 ans et à des adultes âgés entre 18 et 24 ans, comparés à un groupe contrôle. Les résultats démontrent des améliorations significatives suite à l'entraînement. Aussi, des effets de transfert proche sur une tâche similaire d'inhibition à la réponse ont été observés chez les enfants et les adultes. De plus, des effets de transfert fiables, même de courte durée, ont été trouvés uniquement pour les enfants, en particulier pour les performances de la mémoire de travail et de la flexibilité cognitive. Ces résultats suggèrent un potentiel de programmes d'entraînement à l'inhibition de la réponse pour améliorer les aspects du fonctionnement cognitif chez les enfants, mais pas chez les adultes. Dans une autre étude, des chercheurs ont créé leur propre programme d'entraînement destiné à des lycéens américains (Homer et al., 2017). Ce programme appelé *The Alien Game*, permet d'entraîner les capacités de flexibilité cognitive sous forme de jeu vidéo, programmé en collaboration entre des psychologues et des *game designers*. Ils ont proposé ce jeu de 20 minutes par semaine à des lycéens âgés de 14 à 18 ans pendant 6 semaines consécutives. Les résultats démontrent que *The Alien Game* améliore les capacités cognitives : les lycéens ont des performances significativement meilleures au posttest comparé au prétest à une tâche mesurant la flexibilité cognitive (*Dimensional Change Card Sort* ou DCCS) et une autre mesurant les capacités inhibitrices (tâche de Flanker). Ceci

soutient le fait que les jeux vidéo peuvent être des outils efficaces pour entraîner les compétences cognitives, lorsqu'ils sont explicitement conçus à cette fin et lorsqu'une approche de conception rigoureuse est utilisée. Une autre équipe a utilisé le jeu *Mind Frontiers* (Baniqued et al., 2015) composé de sept tâches cognitives modifiées afin d'améliorer l'esthétique des tâches sur le thème du Western, incluant des *feedbacks* motivants pour encourager les participants à continuer à jouer (Souders et al., 2017). Ils ont proposé ce jeu à des personnes âgées (+ de 65 ans) pendant 1 mois de 30 à 45 minutes par jour. Les résultats démontrent que les participants améliorent leurs compétences et apprennent des stratégies spécifiques grâce à l'entraînement au jeu *Mind Frontiers*, ce qui a influencé leurs performances dans une tâche similaire, reflet du transfert proche. Cependant, même cet effet de transfert proche était faible. Bien que les résultats n'aient pas été positifs en ce qui concerne les effets de transfert proche ou lointain, des études de plus longue durée avec des échantillons plus importants et avec une période de rétention sont nécessaires avant que le bénéfice de cette intervention spécifique ne puisse être exclu.

Une des explications est la grande différence dans le matériel et méthode utilisés entre les différentes équipes de recherche (Karbach & Unger, 2014). En effet, pratiquement aucune étude ne reprend la même fréquence, la même durée et le même type d'entraînement. Certaines études montrent qu'un entraînement à la mémoire de travail induit un transfert au niveau du raisonnement ou de la mémoire (Jaeggi et al., 2008; Au et al., 2015). D'autres études n'ont trouvé aucun effet de transfert aussi bien proche que lointain (Thorell et al., 2009) alors qu'une étude plus récente a trouvé des résultats contraires (Zhao et al., 2016). Dans celle-ci, des enfants ont suivi un entraînement à la tâche de go/no-go dont la difficulté était adaptative. Les résultats montrent un transfert proche, c'est-à-dire une amélioration des performances à la tâche entraînée, mais relèvent surtout que cette amélioration persévère 3 mois après l'entraînement. Les effets de transfert lointain restent très rares (Souders et al., 2017).

Au niveau cérébral, si l'apprentissage résulte d'un changement de stratégie, on pourrait s'attendre à ce que les régions du cerveau activées avant l'entraînement soient différentes de celles activées plus tard en supposant que la nouvelle et l'ancienne stratégie impliquent différentes régions cérébrales (Jonides et al., 2004). Une autre hypothèse serait de considérer que

l'apprentissage permettrait d'augmenter l'efficacité d'une stratégie déjà existante et donc aucune nouvelle région cérébrale ne devrait être recrutée. L'activité au sein des régions recrutées avant l'entraînement devrait changer, c'est-à-dire est-ce que l'activité cérébrale augmenterait ou diminuerait suite à un apprentissage ? Intuitivement, on peut émettre l'hypothèse que l'activation cérébrale diminue, puisqu'une automatisation devrait nécessiter une activité neuronale de moins en moins importante (Jonides et al., 2004). Dans une étude en IRMf il a été montré, dans un premier temps, suite à un entraînement à la mémoire de travail une augmentation de l'activation cérébrale dans le cortex frontal et pariétal ainsi qu'au niveau du thalamus et des noyaux gris centraux. Dans un deuxième temps, on constate une diminution de l'activation dans un autre ensemble de régions comme le cortex cingulaire antérieur, le gyrus postcentral et le sillon frontal inférieur (Olesen et al., 2004). De plus, des performances cognitives élevées sont associées à un niveau BOLD (blood oxygen–level dependent signal) moins élevé dans les structures neurales associées. Cette découverte est le reflet d'une utilisation efficace des ressources neuronales chez les individus très performants en raison d'un besoin d'effort moins important ou d'une charge cognitive réduite. En revanche, chez des individus peu performants, on constate le recrutement de ressources neuronales compensatoires ou non essentielles (Putkinen & Saarikivi, 2018). Dans une étude en IRMf, des chercheurs ont tenté d'étudier les effets de l'entraînement au contrôle inhibiteur sur une tâche non-entraînée de régulation émotionnelle (Beauchamps et al., 2016). Les participants âgés entre 18 et 30 ans, ont suivi un entraînement à la tâche de stop-signal pendant 3 semaines (i.e. 10 sessions). Les résultats démontrent des changements d'activation neuronales entre le pré et le posttest pendant la tâche non-entraînée de régulation émotionnelle en l'absence de changements comportementaux. Plus spécifiquement, les participants du groupe entraîné ont démontré une activation réduite au cours de la tâche de régulation émotionnelle au niveau du gyrus frontal inférieur gauche et du gyrus supramarginal, qui sont des régions clés du réseau neuronal du contrôle inhibiteur.

Il semble y avoir des preuves relativement cohérentes de la réduction du recrutement des régions frontales et pariétales chez l'adulte induite par l'entraînement des fonctions exécutives. De plus, certaines données suggèrent qu'il en est de même chez les adolescents, alors qu'on

ne sait presque rien des effets de l'entraînement cognitif sur l'activité cérébrale chez les enfants en bonne santé (Putkinen & Saarikivi, 2018).

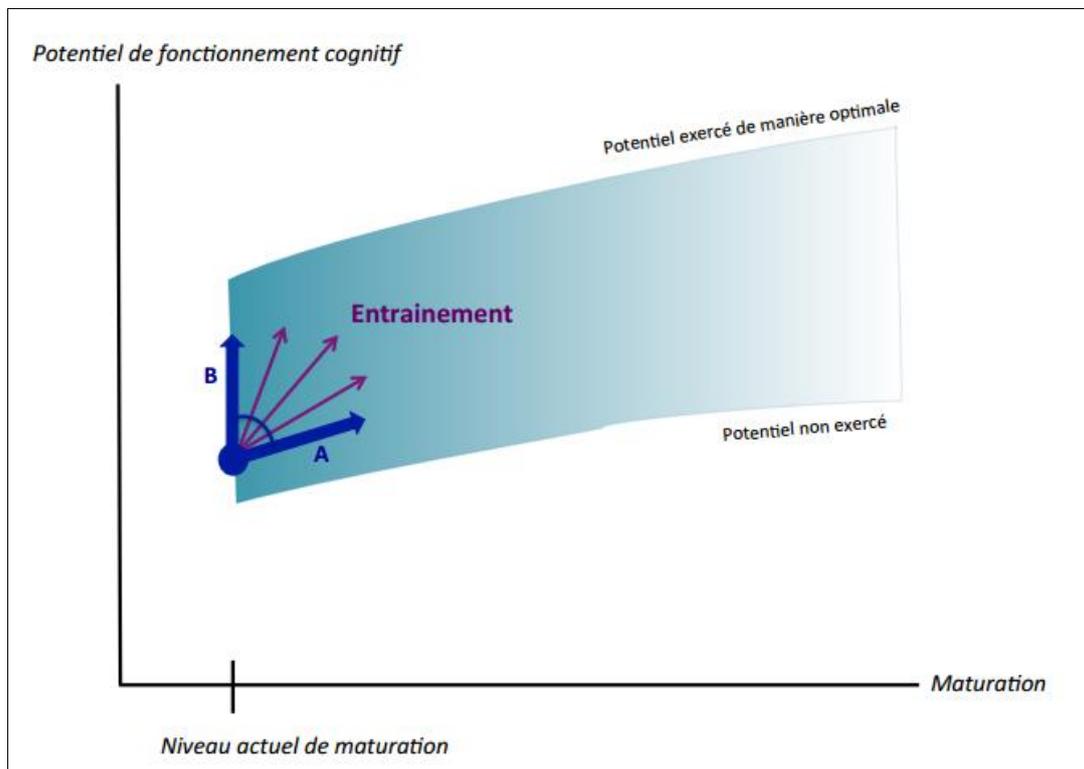
### **III. Définition et utilité des études de l'entraînement cognitif**

L'un des effets de l'entraînement et/ou de l'apprentissage sur le cerveau d'enfants en plein développement semble être l'accélération du développement cognitif avec par exemple l'augmentation du volume de matière grise, afin que le traitement cognitif et l'aspect cérébral soient davantage identiques à celui de l'adulte (cf. Figure 10, flèche A) (Jolles & Crone, 2012). Par exemple, une étude a démontré une augmentation de l'épaisseur corticale chez des adolescents au niveau des régions frontales et pariétales après avoir joué au Tétris® pendant 3 mois (Haier et al., 2009). Une autre possibilité sur les effets de l'entraînement cognitif, aussi bien d'un point de vue comportemental que cérébral, est qu'il pourrait créer une dérive du développement cognitif 'typique' (cf. Figure 10, flèche B).

Un autre apport de ce type d'étude est de permettre de mieux comprendre la mise en place des fonctions exécutives et surtout les nombreuses différences intra et interindividuelles en terme de performances cognitives puisque celles-ci sont impliquées dans de multiples aspects comme les apprentissages scolaires, le succès au travail et la santé mentale et physique. L'enjeu est donc de taille. Suivant les résultats, il sera certainement possible de pouvoir 'prescrire' des interventions ciblées au début de l'apprentissage (i.e. pendant l'enfance, notamment en classe) ou suite à des déficits cognitifs (i.e. vieillissement cognitif).

Dans une étude en TEP, il a été montré que, chez l'adulte, un entraînement de seulement quelques minutes permet d'améliorer les performances des participants face à un problème de raisonnement (Houdé et al., 2000). L'étude a également soulevé un changement de l'activité cérébrale qui passe d'un réseau activé à l'arrière de la tête, c'est-à-dire plutôt visuel, à un réseau activé à l'avant, c'est-à-dire plutôt frontal impliquant les fonctions exécutives (Houdé et al., 2000). Ce résultat prouve qu'un entraînement cognitif, même très court et chez des adultes, permet de

changer leurs performances avec des répercussions au niveau de l'activation cérébrale.



**Figure 10 :** Influence possible d'un entraînement sur les trajectoires développementales (figure adaptée de Jolles & Crone, 2012). La courbe bleue claire montre le potentiel du fonctionnement cognitif qui augmente avec l'âge en raison de la maturation et de l'expérience. La flèche A montre comment l'entraînement peut améliorer le fonctionnement cognitif en accélérant le développement. La flèche B montre comment l'entraînement peut améliorer le développement en le déviant de sa trajectoire développementale typique.

### a. Deux types de paradigmes d'entraînement cognitif

Dans la littérature, deux types de paradigmes d'entraînement cognitif sont utilisés (Lustig et al., 2009; Noack et al., 2009; Kliegel & Bürki, 2012; Karbach & Unger, 2014; Verhaeghen, 2014). Le premier est le paradigme basé sur les stratégies (i.e. *strategy-based training* en anglais). Ce type de paradigme implique un entraînement à une tâche spécifique. Il consiste, par exemple, à identifier les tâches cognitives pour lesquelles les personnes âgées ont des difficultés et à les entraîner à des stratégies susceptibles d'améliorer leurs performances (Lustig et al., 2009). Il est donc très souvent utilisé pour des études sur la mémoire, utilisant par exemple la méthode de

Loci. Cette tâche nécessite d'utiliser l'imagination mentale pour encoder et extraire des listes de mots de la mémoire dans un certain ordre. Cette méthode entraîne des améliorations importantes et souvent durables, mais présente de très faibles taux de transfert (Verhaeghen et al., 1992; Rebok et al., 2007). Une méta-analyse a démontré l'efficacité de l'entraînement à la mémoire chez les personnes âgées, de 60 ans ou plus, en mesurant les gains entre le pré et le posttest sur des tests de mémoire épisodique (Verhaeghen et al., 1992). Les gains entre le pré et le posttest étaient significativement plus importants dans les groupes ayant suivi un entraînement que dans les groupes témoin et les groupes placebo. Une revue de la littérature suggère que, malgré les variations dans les méthodes d'entraînement et dans les échantillons des participants, des preuves croissantes prouvent que les personnes âgées en bonne santé et sans déficit cognitif peuvent améliorer et conserver leurs compétences en matière de mémoire (Rebok et al., 2007). Ces études ont souvent révélé des effets importants et durables sur la tâche entraînée, mais seulement des preuves limitées de transfert.

Les entraînements multi-domaines sont plus complexes du fait qu'ils impliquent de multiples processus cognitifs et donc qu'ils produisent des effets de transfert larges mais souvent faibles (Basak et al., 2008). Mais surtout, s'ils induisent des effets de transfert, il est très difficile de déterminer les caractéristiques spécifiques incitées par l'entraînement suivi. Dans une étude réalisée chez des personnes âgées, l'objectif de l'entraînement cognitif était de ralentir ou d'inverser ces baisses exécutives liées à l'âge (Basak et al., 2008). Les résultats démontrent une amélioration significative des performances au jeu de stratégie utilisé pendant l'entraînement. Cependant, les résultats ne confirment pas si l'entraînement cognitif peut engendrer un transfert vers diverses compétences cognitives chez les personnes âgées.

À l'opposé, il y a les paradigmes basés sur les processus cognitifs (i.e. *process-based training* en anglais). Ils ne sont pas spécifiques à une tâche puisqu'ils ciblent des capacités de traitement plus générales en prenant en charge un ensemble d'opérations cognitives, telles que la vitesse de traitement ou les fonctions exécutives. Plusieurs études ont démontré des effets de transfert encourageants (Hertzog et al., 2008; Karbach & Schubert, 2013; Kray & Ferdinand, 2013; Titz & Karbach, 2014). La plupart des études utilisant ce type de paradigme appliquent des

interventions basées sur l'entraînement au contrôle exécutif (Kray et al., 2012; Lussier et al., 2012; Strobach et al., 2012b), ou sur l'entraînement à la mémoire de travail (Brehmer et al. 2012; Salminen et al., 2012; Schneiders et al., 2012; Söderqvist et al., 2012), mais aussi sur différents types d'entraînement physique (Gajewski & Falkenstein, 2012; Zinke et al., 2012a, b). Dans une étude comparant des personnes âgées à de jeunes adultes, ayant tous suivi un entraînement avec un paradigme de double tâche, les chercheurs ont étudié les effets de transfert et l'existence potentielle de différences liées à l'âge dans les effets du transfert (Lussier et al., 2012). Les résultats démontrent un effet de transfert proche, avec une amélioration des performances dans un paradigme de double tâche. Cependant ils ne démontrent pas d'effets de transfert lointain. Dans l'ensemble, cette étude appuie le fait que la plasticité cognitive du contrôle attentionnel est préservée même à la fin de l'âge adulte. Une autre étude, utilisant également un entraînement à un paradigme de double tâche, a démontré qu'avec une difficulté adaptée à leurs compétences, les personnes âgées présentaient des performances similaires à celles des jeunes adultes (Strobach et al., 2012b). Par conséquent, les personnes âgées sont tout à fait réceptives à l'entraînement exécutif, si celui-ci est adapté à leur niveau de base, de la même manière que les jeunes adultes. C'est pour cela qu'il est intéressant d'étudier également les enfants atteints de TDAH qui présentent un déficit exécutif touchant les capacités de flexibilité cognitive, de mémoire de travail et d'inhibition. Dès lors, des chercheurs ont tenté d'examiner si un entraînement à la flexibilité cognitive induisait une amélioration de ces fonctions exécutives (Kray et al., 2012). Les enfants des deux groupes ont montré des améliorations dans les tâches de flexibilité cognitive, c'est-à-dire une réduction du coût de flexibilité cognitive (i.e. *switching* en anglais). Cependant, les résultats ne confirment pas d'effet de transfert lointain. Les améliorations de performances sont retrouvées uniquement pour les tâches de flexibilité cognitive. Ces résultats suggèrent que ce type de paradigme est plus efficace que les paradigmes basés sur la stratégie. De plus, l'entraînement cognitif améliore les fonctions exécutives et joue donc un rôle important dans de multiples domaines comme le niveau scolaire, le statut socioéconomique et la santé physique (Eigsti et al., 2006; Blair & Razza, 2007; Moffitt et al., 2011). Cette amélioration est d'autant plus sensible pendant l'enfance et l'adolescence puisque les plasticités comportementale et neurale sont

particulièrement élevées pendant ces périodes. Les régions cérébrales impliquées dans les fonctions exécutives, comme les lobes préfrontaux, sont particulièrement sensibles aux influences environnementales chez les enfants (Bull et al., 2011). Il n'est donc pas surprenant que de nombreux entraînements aient été conçus pour améliorer le fonctionnement cognitif tout au long de la vie, et tout particulièrement pendant l'enfance et l'adolescence (Diamond & Lee, 2011; Karbach & Unger, 2014).

### **b. Les différences individuelles dans les bénéfices de l'entraînement**

Deux différents types de profils ont été proposés pour expliquer les différences individuelles dans la plasticité cognitive (Lövdén et al., 2012). Le premier correspond au phénomène d'amplification (i.e. *the magnification account* en anglais). Ce dernier considère que les individus qui sont déjà très performants avant l'entraînement vont montrer plus d'améliorations et de bénéfices suite à cet entraînement, parce qu'ils ont des ressources cognitives plus efficaces pour acquérir et mettre en place de nouvelles stratégies (Baltes & Kliegl, 1992; Lindenberger et al., 1992; Verhaeghen & Marcoen, 1996; Brehmer et al. 2007; Karbach et al., 2017). Celui-ci renvoie également plus particulièrement à un paradigme basé sur les stratégies. Dans une étude cherchant à analyser le lien entre les effets de l'entraînement cognitif sur les performances et le niveau scolaire des participants, les résultats ont démontré que, plus le niveau scolaire était élevé, plus les participants tiraient bénéfice de l'entraînement (Guerra-Carrillo et al., 2017).

Le deuxième profil fait référence au phénomène de compensation (i.e. *the compensation account* en anglais). Ce dernier considère que les individus très performants seront ceux qui bénéficieront le moins de l'entraînement, du fait qu'ils 'fonctionnent' déjà à un niveau optimal, ce qui laisse moins de place à l'amélioration (Kray & Lindenberger 2000; Cepeda et al., 2001; Bherer et al., 2008; Kray et al., 2008; Karbach & Kray 2009; Brehmer et al., 2012; Zinke et al., 2014). Dans une étude, des chercheurs ont tenté de répondre à la question suivante : les personnes ayant un niveau élevé de ressources cognitives bénéficient-elles plus ou moins d'un entraînement cognitif ?

(Lövdén et al., 2012). Pour y répondre, ils ont comparé trois groupes d'âges, avec des participants âgés de 9 à 12 ans, de 20 à 25 ans et de 65 à 78 ans, avant et après un entraînement à la méthode de Loci. Les résultats montrent une diminution des différences interindividuelles et les chercheurs en concluent que la mise en place d'une stratégie (grâce à l'entraînement) est davantage bénéfique à ceux qui avaient de moins bonnes performances au prétest. Une autre preuve de cela est le fait que les enfants atteints de TDAH présentent de faibles capacités de mémoire de travail (Moffitt et al., 2011), ils peuvent donc palier leurs difficultés grâce à un entraînement aux fonctions exécutives (Diamond & Lee, 2011). De la même manière, plusieurs études ont révélé un effet bénéfique de l'entraînement aux fonctions exécutives plus important chez les enfants et les personnes âgées, du fait qu'ils ont de moins bonnes performances que les jeunes adultes (Karchach & Unger, 2014). Une étude réalisée chez des jeunes adultes (18-35 ans) confirme à nouveau ce type de profil suite à un entraînement (Foster et al., 2017). En effet, l'entraînement à la mémoire de travail est davantage bénéfique pour les participants qui avaient un empan faible au moment du prétest. Néanmoins, une autre étude a révélé le fait que, si les participants présentaient un déficit cognitif sévère ou encore avaient un quotient intellectuel faible, l'entraînement ne permettrait pas d'améliorer leurs performances (Colcombe & Kramer, 2003; Söderqvist et al., 2012).

Malgré l'existence de ces deux profils de bénéfices suite à un entraînement, il faut prendre en compte le fait que de nombreux facteurs peuvent influencer ces effets bénéfiques, comme par exemple les effets de la plasticité cérébrale en fonction des facteurs génétiques ou encore selon les influences environnementales (Jolles & Crone, 2012). De la même manière, la structure du cerveau permet aussi de prédire l'impact qu'aura un entraînement cognitif sur les performances cognitives (Golestani et al., 2002; Erickson et al., 2010). Cette influence cérébrale a aussi un effet sur le stress, la tristesse ou la mauvaise santé (Diamond & Ling, 2016).

Cependant, la plupart des résultats sont basés sur des comparaisons au niveau des groupes, et une analyse des résultats regardant les différences individuelles dans les bénéfices de l'entraînement est manquante. Ce point est particulièrement important à comprendre pour des populations comme les enfants ou les personnes âgées. En effet, dans ces groupes d'âges les différences individuelles sont plus grandes et plus marquées que chez les jeunes adultes, qui ont

des performances pratiquement similaires. De plus, l'utilisation de moyennes pour comparer les groupes dans les analyses statistiques amoindrit les différences inter et intra individuelles, et ne leur rend pas justice. Plutôt que d'étudier l'efficacité d'un paradigme, il faudrait étudier pour qui l'entraînement peut fonctionner, tout en regardant les différences intra-individuelles dans les changements induits par un entraînement grâce aux variables et aux facteurs latents plutôt que de se baser sur de simples scores (Schmiedek et al., 2010).

#### **IV. Études des effets de l'entraînement des fonctions exécutives**

Comme déjà décrit plus haut, il existe de nombreuses études sur les effets de l'entraînement. Nous allons ici encore une fois, nous focaliser sur les études concernant un entraînement des fonctions exécutives. En effet, c'est le thème central de cette thèse et par conséquent, ces travaux sont à nos yeux primordiaux à présenter.

Il existe beaucoup d'études analysant l'entraînement à la mémoire de travail (Klingberg, 2010; Jaeggi et al., 2011; Shipstead et al., 2012; Titz & Karbach, 2014). Certaines équipes de recherche ont d'ailleurs créé un programme d'entraînement appelé Cogmed® (créé par le laboratoire de Torkel Klingberg du Karolinska Institute, en 2001). Les résultats démontrent que l'entraînement Cogmed® améliore les capacités d'attention, de concentration, de raisonnement complexe, et ceci en augmentant sensiblement et durablement la capacité de la mémoire de travail. L'équipe de Torkel Klingberg a étudié les effets d'un entraînement à la mémoire de travail chez des enfants atteints de TDAH (i.e. trouble dysfonctionnel de l'attention avec ou sans hyperactivité). En toute logique, les résultats démontrent un effet bénéfique sur les capacités de mémoire de travail, de raisonnement et de contrôle inhibiteur suite à un entraînement intensif chez des enfants présentant un déficit attentionnel (i.e. 25-40/jour pendant 5 semaines) (Klingberg et al., 2002 & 2005; Holmes et al., 2010). On retrouve également le même type de résultats chez des enfants avec un développement 'typique' : les performances des enfants de 4 ans ayant suivi un entraînement de 5 jours diffèrent significativement du groupe contrôle (Rueda

et al., 2005). Ce résultat n'est cependant pas retrouvé chez des enfants de 6 ans. D'autres études encore se sont concentrées sur l'apport au niveau des performances dans certains apprentissages scolaires comme les mathématiques, mais elles ne montrent cependant pas d'effet suite à un entraînement à la mémoire de travail, alors qu'il y a un effet sur la compréhension de la lecture (Shalev et al., 2007). D'autres études encore trouvent qu'un apprentissage à la mémoire de travail (20-30 minutes/jour, 5 jours/semaine et pendant 4 semaines) peut améliorer les performances aux tests chez des enfants, mais il n'est pas confirmé que cela provoque un effet de généralisation (i.e. de transfert) sur le fonctionnement intellectuel ou sur les performances scolaires (Rode et al., 2014). D'autres études observant les effets de l'entraînement à la mémoire de travail ont montré une amélioration des performances aux tests de mémoire chez de jeunes adultes, et un changement des stratégies utilisées pour réaliser les tests (Dunning et al., 2014). D'un autre côté, certains chercheurs n'ont pas retrouvé les effets bénéfiques de l'entraînement chez des enfants 'sains' (Rode et al., 2014). Ils en concluent que l'entraînement à la mémoire de travail peut améliorer les performances aux tests chez des enfants, mais il n'est pas confirmé que cela provoque un effet de transfert sur le fonctionnement intellectuel ou les performances scolaires. Une étude comparant un groupe de personnes âgées à un groupe de jeunes adultes suivant un entraînement à la mémoire de travail a montré que les deux groupes d'âges pouvaient améliorer leurs performances de mémoire de travail (Bailey et al., 2015). Logiquement, le manque de transfert pas indique que l'amélioration des capacités de mémoire de travail après l'entraînement ne génère pas de généralisation des bénéfices. Une étude en IRMf chez des adultes a démontré une amélioration des performances à la tâche de *n-back* chez le groupe ayant suivi un entraînement comparé au groupe contrôle (Buschkuehl et al., 2014). Les résultats de cette étude montrent également une augmentation de l'activation cérébrale au niveau des gyri frontaux post centraux droit et supérieur gauche, mais également au niveau des gyri occipitaux supérieurs droit et moyen droit seulement pour le groupe entraîné comparé au groupe contrôle, confirmant leurs hypothèses.

Malgré le fait que les études sur les effets de l'entraînement à la mémoire de travail soient plus nombreuses que celles sur l'entraînement au contrôle inhibiteur, les résultats ne sont pas

unanimes. Une des explications à cela, comme déjà souligné, est l'utilisation très variée et différenciée dans les matériels et méthodes (Karbach et al., 2017). Il en est de même pour les études sur l'entraînement du contrôle inhibiteur. Une étude réalisée chez des enfants âgées de 4 à 5 ans n'a pas retrouvé d'effets de transfert proche ou lointain (Thorell et al., 2009). Dans une autre étude en EEG, l'entraînement au contrôle inhibiteur, à l'aide de la tâche de go/no-go, améliore les compétences des participants âgés entre 22 et 39 ans. Les résultats montrent une diminution significative du temps de réponse aux items go après l'entraînement (Manuel et al., 2010). La même équipe a réalisé une deuxième étude sur les effets de l'entraînement au contrôle inhibiteur chez l'adulte (moyenne d'âge : 23,9 ans) (Manuel et al., 2012). Les participants ont cette fois suivi un court entraînement d'une heure à la tâche de stop-signal. Les résultats confirment une amélioration des performances à la tâche entraînée. En effet l'indice SSRT diminue, reflétant de meilleures capacités d'inhibition. Les chercheurs observent également des changements dans les réponses neuronales, ce qui indique que même les réseaux neuronaux exécutifs peuvent être modifiés grâce à un entraînement au contrôle inhibiteur de seulement une heure. Une étude en IRMf a révélé que les participants assignés au hasard à un entraînement du contrôle inhibiteur s'améliorent considérablement plus dans la tâche de stop-signal en comparaison aux membres du groupe contrôle. Les résultats démontrent également que l'ampleur de cette amélioration des performances corrèle avec la diminution de l'activité cérébrale au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral au cours des items stop (reflet des capacités d'inhibition) (Berkman et al., 2014). Certains auteurs ont tenté de répondre aux questions suivantes : est-il possible d'améliorer le contrôle inhibiteur grâce à l'entraînement ? Si oui, par quels moyens ? Et quels sont les mécanismes neuro-plastiques sous-jacents ? (Chavan et al., 2015). Pour cela, ils ont utilisé une approche multimodale avec l'IRMa, IRMf et l'IRMd afin de mesurer les effets de 2 semaines d'entraînement à une tâche de go/no-go chez de jeunes adultes (âgés de 22 à 32 ans). Les améliorations comportementales induites par l'entraînement ont été accompagnées d'une diminution de l'activité neuronale pendant les essais inhibiteurs (i.e. les items no-go) au niveau du pars operculaire, du triangulaire droit et du pars orbitaire gauche. Les analyses de ces modifications de l'anatomie cérébrale ont révélé des augmentations du volume de matière grise

dans le pars orbitaire droit et des modulations de la microstructure de la substance blanche dans le pars triangulaire droit. Ces changements neuro-plastiques dus aux effets de l'entraînement ont été confirmés par l'absence de changement de l'activité neuronale dans une tâche contrôle de mémoire de travail. Dans une autre étude, cette fois-ci réalisée chez des personnes âgées, les résultats montrent un effet de transfert proche sans pour autant révéler d'effet de transfert lointain (Wilkinson et al., 2015). En d'autres termes, cet effet de transfert proche induit une amélioration des performances aux tâches entraînées sans généralisation des bénéfices alors que chez des enfants âgés de 10 à 12 ans ainsi que chez des adultes, des effets de transfert proche ont été retrouvés suite à un entraînement au contrôle inhibiteur à l'aide de la tâche de go/no-go (Zhao et al., 2016), avec des effets de transfert fiables uniquement retrouvés chez les enfants, et en particulier pour la mise à jour de la mémoire de travail et la flexibilité cognitive. Dans une autre étude, des chercheurs ont étudié les effets, très peu connus, d'un entraînement à très long terme du contrôle inhibiteur sur les mécanismes neuronaux soutenant une amélioration durable (Chavan et al., 2017). Pour cela ils ont comparé un groupe de sportifs de haut niveau ayant suivi un entraînement au contrôle inhibiteur d'en moyenne 20 000 heures durant 15 ans, à un groupe contrôle de non-athlètes, ayant suivi un entraînement de 1h par jour pendant 14 jours consécutifs à la tâche de go/no-go dans une étude précédente (cf. Chavan et al., 2015). Les résultats démontrent que, dans le groupe d'athlètes, les capacités inhibitrices et la quantité d'entraînements sont corrélées positivement avec l'anisotropie fractionnelle (FA) des zones de la matière blanche se projetant sur les noyaux gris centraux dans les zones motrices supplémentaires. Cependant, les athlètes n'ont montré aucun changement dans le volume de matière grise ou dans l'organisation fonctionnelle du réseau de contrôle inhibiteur fronto-basal. De plus, les performances et l'activité neuronale du groupe d'athlètes pendant une tâche de mémoire de travail à 2 *backs* ne diffèrent pas de celles du groupe contrôle, garantissant que leur expertise était bien spécifique au contrôle inhibiteur. Ces résultats indiquent que les changements de l'activité neuronale et de l'architecture de la matière grise accompagnent l'amélioration des performances du contrôle inhibiteur après un entraînement à court et à moyen terme, mais que les améliorations du contrôle inhibiteur de longue durée dépendent principalement du

renforcement de la connectivité structurale fronto-basale. Cependant, une étude réalisée chez des jeunes adultes (moyenne d'âge :  $22,49 \pm 5,80$  ans) ayant suivi un entraînement à la tâche de Stroop, ne confirme pas l'existence d'effet de transfert (Talanow & Ettinger, 2018). En effet, dans le groupe entraîné, les performances à la tâche de Stroop se sont améliorées avec la pratique, sans toutefois se généraliser aux tâches d'inhibition non-entraînées, comme une tâche d'anti-saccades ou une tâche de mémoire de travail (e.g. *n-back*). Les performances dans le groupe de contrôle actif sont, elles, restées inchangées.

Par conséquent, différents types d'interventions ont tenté d'améliorer les fonctions exécutives en raison de leur rôle essentiel dans la cognition humaine et dans la régulation du comportement. Bien que les fonctions exécutives soient considérées comme diverses, la plupart des études avec un entraînement ont ciblé des processus cognitifs liés à la mémoire de travail et ont moins mis l'accent sur l'entraînement d'autres composants exécutifs, tels que le contrôle inhibiteur (Maraver et al., 2016). Une des difficultés dans l'entraînement au contrôle inhibiteur est le fait que la capacité cognitive d'inhibition ne soit pas sollicitée de manière continue tout au long de la tâche, contrairement à une tâche de mémoire de travail. Par exemple, avec la tâche de go/no-go et la tâche de stop-signal, l'inhibition n'est requise que pour certains items au cours de la tâche contrairement à la tâche de *n-back* au cours de laquelle la mémoire de travail est stimulée à chaque item. L'entraînement perd donc en intensité, ce qui explique la diversité dans les résultats (Thorell et al., 2009).

## **V. Conclusion**

Nous avons donc à présent la réponse à notre question : que se passerait-il si les capacités inhibitrices étaient entraînées, comme on peut s'entraîner à un sport ou se rééduquer suite à une lésion ? Les capacités cognitives sont donc tout à fait entraînables. L'entraînement exécutif peut renforcer les compétences cognitives tout comme renforcer des compétences 'faibles'. L'entraînement peut, en plus d'améliorer les capacités entraînées, induire des effets bénéfiques à

long terme et sur des capacités non entraînées. Effectivement, les bénéfices obtenus suite à un entraînement peuvent se généraliser à d'autres compétences cognitives non entraînées. De fait, les effets de l'entraînement semblent très prometteurs dans de nombreux cas, tels que la prescription d'interventions afin de compenser les effets du vieillissement cognitif. Par ailleurs, ces interventions peuvent être utiles chez des adultes, par exemple à la suite d'une lésion cérébrale, mais également chez des enfants atteints de TDAH ou avec quelques difficultés pendant la mise en place des apprentissages à l'école. Malheureusement, il existe encore de nombreuses parts d'ombre dans l'étude des effets d'un entraînement cognitif. Par conséquent, des approfondissements sont nécessaires.

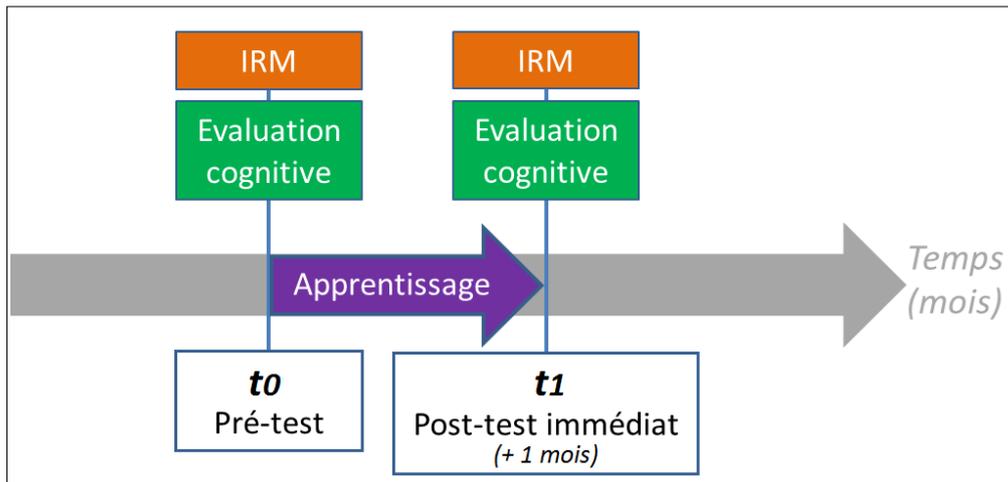
## OBJECTIFS DE LA THÈSE

Le constat est qu'il existe une disproportion dans les études des effets de l'entraînement exécutif, avec un plus grand nombre d'études suivant un apprentissage à la mémoire de travail et chez une population présentant un déficit attentionnel par exemple. Le but de cette thèse est de contrebalancer ce déséquilibre en étudiant les effets d'un apprentissage au contrôle inhibiteur 'pur' chez des enfants 'sains'. Le choix d'entraîner le contrôle inhibiteur n'est pas sans raison non plus. Nous nous plaçons aux côtés des chercheurs qui considèrent cette composante exécutive comme un élément essentiel dans la mise en place des apprentissages. En effet, selon Jean Piaget l'intelligence est l'aptitude à construire et à activer de nouvelles stratégies, ce à quoi il faut ajouter la capacité d'apprendre à inhiber les pièges (i.e. les heuristiques). Dans un premier temps, nous tenterons de savoir s'il est possible d'améliorer les capacités inhibitrices chez des enfants d'âge scolaire par le biais d'un entraînement intensif (15 minutes par jour, 5 jours par semaine pendant 5 semaines). Ensuite nous vérifierons si, suite à cette intervention, il y a des effets de transfert proche et/ou lointain. Dans un deuxième temps, nous regarderons tout au long de l'entraînement la progression des scores des enfants (i.e. meilleur niveau atteint pendant la séance) ainsi que le niveau de motivation, grâce à une échelle auto-remplie par les enfants évaluant leur propre motivation pendant la séance (i.e. échelle de Likert de 0 à 5). Le but ici est de comprendre plus précisément la réceptivité des enfants à l'entraînement, tout en prenant en compte l'influence de la motivation sur les scores des enfants. Troisièmement, nous utiliserons l'IRMa, marqueur trait de la plasticité neuronale, afin de mesurer les changements macroscopiques observés au niveau cérébral anatomique chez les enfants et des adolescents suite à l'apprentissage.

# PROCOLE APEX

Encore aujourd'hui, il manque une étude comportementale avec une approche cérébrale multi-modale sur les effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur chez les enfants 'sains'. En effet l'inhibition tient un rôle central au cœur des fonctions exécutives et a une fonction toute particulière dans la mise en place des apprentissages scolaires. Par conséquent, il est crucial d'étudier cette composante exécutive.

Aussi, le fait que ce soit durant l'enfance que les plasticités cognitive et cérébrale soient à leur maximum (Bull et al., 2011), ceci en fait une période idéale pour mettre en place un entraînement au contrôle inhibiteur. Cela est d'autant plus critique que les conclusions des études comportementales actuelles sont contradictoires. C'est donc l'objectif de cette thèse : tester l'impact d'un apprentissage exécutif ciblé sur le contrôle inhibiteur chez des enfants volontaires sains d'âge scolaire (9-10 ans), de façon comparable et équilibrée, grâce aux technologies d'imagerie cérébrale comme l'IRM. Cette étude appelée APEX, pour APprentissages EXécutifs et cerveau chez des enfants d'âge scolaire, a été évaluée et validée par le comité de protection des personnes (CPP) Nord-Ouest III (N° ID RCB 2015-A00383-46). Cette recherche fondamentale suit une méthodologie expérimentale classique d'apprentissage micro-longitudinale avec : un prétest (Évaluation cognitive-1 et IRM-1), un apprentissage à la maison (sur tablette tactile), et un posttest immédiat (à la fin de l'apprentissage, Évaluation cognitive-2 et IRM-2) (cf. Figure 11)).



**Figure 11 :** Déroulé microlongitudinal de la participation d'un enfant au protocole APEX.

## I. Recrutement

Soixante enfants volontaires ont participé à cette étude. Ils ont tous suivi à l'identique le même protocole, à l'exception de l'apprentissage. Ils ont été assignés aléatoirement dans le groupe expérimental (i.e. entraînement au contrôle inhibiteur) ou dans le groupe contrôle actif (i.e. répondre à des questions de culture générale). Tous les enfants ont été recrutés dans les écoles élémentaires publiques et privées de la ville de Caen ou dans ses alentours. Le laboratoire bénéficie depuis de nombreuses années d'un partenariat fort et fidélisé avec les établissements scolaires du Calvados. Ce partenariat a donné naissance à une convention avec l'Inspection d'Académie nous permettant de recruter les enfants directement dans les écoles primaires intéressées par le projet, mais surtout de créer un échange avec le corps enseignant des établissements. En plus de la convention, nous avons systématiquement demandé l'accord des directeurs d'établissements et des enseignants des classes nous intéressant pour le projet, c'est-à-dire les classes de CE2, CM1 et CM2. Pour cela, un premier contact était établi par e-mail ou par téléphone afin de fixer un rendez-vous (généralement pendant l'heure du midi) pour pouvoir leur présenter le projet de vive voix, mais aussi pour pouvoir répondre aux éventuelles questions. Une fois les accords obtenus, nous allions directement dans les classes pour présenter rapidement le projet aux élèves et pour ensuite

distribuer un courrier proposant une réunion d'informations destinée aux familles curieuses et/ou intéressées. Ces réunions d'informations auprès des familles ont été primordiales dans cette étape du recrutement. Nous distribuions également deux brochures expliquant le but de l'étude, l'une d'entre elles était destinée aux parents et l'autre aux enfants (cf. annexe 2). La brochure destinée aux parents expliquait dans un premier temps ce qu'est la plateforme CYCERON ainsi que la machine IRM. Ce dernier point est crucial, du fait que la majorité des inquiétudes des parents était liée à l'utilisation de l'IRM. Ensuite, le document explique le déroulement de l'examen IRM et les différentes séquences qui seront réalisées pour cette étude. Par la suite, la procédure de l'étude est entièrement décrite : la visite d'inclusion, la session d'entraînement, le recueil de données comportementales et enfin la manière d'accéder à la plateforme CYCERON. La deuxième brochure est destinée aux enfants, elle explique à nouveau le but et le principe de l'étude, mais en utilisant des mots appropriés. L'objectif de cette brochure est de faire comprendre clairement à l'enfant ce qu'implique une participation à l'étude, aussi bien dans le déroulement mais également en ce qui concerne l'utilisation des données que nous allons recueillir grâce à lui. Pour cela, il est expliqué ce qu'est une recherche scientifique et à quoi elle sert. Il est aussi explicité à l'enfant que c'est à lui de dire s'il souhaite ou non participer à l'étude. Ensuite, il est porté un intérêt particulier sur l'IRM et le cerveau. Dans un premier point, la brochure décrit aux enfants que l'on peut utiliser un mètre ruban pour mesurer son corps, ou une toise pour plus de précisions. Dans un deuxième point, il est expliqué que grâce à certains appareils on peut voir l'intérieur du corps, comme à l'aide d'une radio quand on se casse un os. Le troisième point aborde le fait que, grâce à l'IRM, on peut 'voir à l'intérieur' de la tête, et donc voir le cerveau. Enfin, le quatrième point explique que dans l'IRM il faut rester allongé et immobile pendant que 'la caméra spéciale prend des photos de son cerveau'. Pour continuer, le document détaille la procédure de l'étude. Et pour terminer, l'enfant peut notifier s'il décide ou non de participer en entourant le smiley 'oui' ou le smiley 'non'.

Cette procédure permettait aux familles intéressées de prendre directement contact avec nous. Les critères d'inclusion ont été vérifiés, en amont du premier jour de participation de l'enfant, au cours d'un entretien téléphonique (de 30 minutes en moyenne) évitant aux familles volontaires de se déplacer sans raison, si par exemple l'enfant présentait un critère de non-

inclusion l'empêchant de participer au projet. Pendant cet entretien téléphonique, tous les aspects et le déroulé complet du projet étaient abordés, afin que tout soit limpide pour les familles volontaires. Il était rappelé aux familles que cette étude fonctionne sur la base du volontariat. Par conséquent, l'enfant peut décider de stopper sa participation à l'étude pour n'importe quelle raison et à n'importe quel moment. À la fin de cet entretien, si l'enfant désireux de participer ne présentait pas de critères de non-inclusion, plusieurs documents étaient alors envoyés aux familles : les consentements à lire, à parapher en bas de chaque page et à signer par les deux parents/tuteurs légaux de l'enfant ainsi qu'un planning exhaustif rappelant les dates et horaires des deux IRM, les documents à fournir, les indications pour se rendre au centre CYCERON, etc. ; ainsi que le contact de la personne référente. En effet, les familles volontaires ont été suivies de près tout au long de leur participation. Afin d'assurer un suivi efficace, elles ont été réparties entre les personnes travaillant sur le projet. Il leur était aussi rappelé à de multiples reprises de ne pas hésiter à contacter leur référent dès qu'ils avaient une question ou un problème, avec la tablette par exemple.

## **II. L'examen IRM**

Les enfants ont passé deux examens IRM identiques nous permettant d'analyser les différents aspects du cerveau (i.e. la matière grise, la matière blanche, l'activation cérébrale, etc.) mais aussi d'analyser les différences cérébrales induites suite à l'apprentissage. Toutes les acquisitions IRM se sont déroulées les mercredis au centre d'imagerie biomédicale CYCERON, situé à Caen. Ce centre d'imagerie est une plateforme IBISA, Infrastructures Biologie Santé et Agronomie, d'imagerie in vivo hébergeant un ensemble unique de laboratoires et d'équipements. Cette plateforme dispose d'un appareil d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) corps entier à haut champ magnétique dédié à la recherche et à l'imagerie chez l'homme : Achieva 3,0 Teslas quasar dual (Philips Healthcare, The Netherlands). L'IRM permet d'obtenir des vues en deux ou en trois dimensions de l'intérieur du corps avec une résolution en contraste relativement élevée, et surtout de manière

non invasive. En effet, l'injection d'eau marquée par exemple n'est pas nécessaire. Elle permet également de voir les multiples aspects du cerveau. Avec cet appareil, il est possible d'étudier l'anatomie cérébrale avec l'IRM anatomique (i.e. IRMa), ce qui permet notamment de mesurer l'épaisseur corticale. Nous pouvons aussi prendre en compte le fonctionnement cérébral avec l'IRM d'activation ou fonctionnel (i.e. IRMf), qui permet d'enregistrer l'activité cérébrale pendant la réalisation d'une tâche cognitive, c'est-à-dire d'enregistrer la variation de concentration en désoxyhémoglobine ou en d'autres termes d'enregistrer la concentration d'oxygène dans le sang qui est amenée dans certaines régions du cerveau pendant la tâche cognitive. Il est également possible d'analyser le fonctionnement cérébral en état de 'repos'. Pour cette séquence, il est donc possible d'examiner le *default mode network* ou le réseau du mode par défaut. Ici nous regardons quelles régions s'activent, se co-activent, se synchronisent ou se désactivent au même moment quand le cerveau est au repos mais actif (i.e. IRMfr ou srMRI en anglais). Et enfin, il permet d'analyser les fibres de la matière blanche grâce à l'imagerie de diffusion, appelée *Diffusion Tensor Imaging* en anglais (i.e. DTI).

Les enfants participant au projet APEX ont tous passé deux IRM à un mois d'intervalle (i.e. 5 semaines). L'acquisition IRM comportait deux parties distinctes séparées par une pause pendant laquelle l'enfant sortait de la machine, ce qui lui permettant de se reposer. Le déroulé de la passation IRM est identique pour tous les enfants et à chaque moment, c'est-à-dire au moment du prétest et du posttest. Néanmoins, l'ordre des deux *runs* d'IRMf a été randomisé, afin que le nombre d'enfants dans les deux groupes d'entraînement soit identique dans les deux conditions possibles (i.e. 1. DOT Task ; 2. SST ou 1. SST ; 2. DOT Task). L'examen IRM commençait par l'acquisition des données anatomiques (IRMa), données qui aux deux temps ont été rigoureusement vérifiées par le médecin de l'équipe (Dr. Orliac) pour détecter une éventuelle anomalie cérébrale. Avec l'accord du médecin nous continuions l'examen IRM par l'acquisition des données fonctionnelles au repos. Ensuite, l'enfant était sorti de la machine afin de lui faire faire une pause. Le médecin profitait de ce moment pour lui montrer les images de son cerveau et lui expliquer son fonctionnement. La deuxième partie comportait les deux *runs* d'activation fonctionnelle (IRMf) et l'acquisition des données de diffusion (DTI).

## **a. Visite d'inclusion et préparation à la passation IRM**

Avant de commencer l'examen IRM, la première étape du rendez-vous était une visite d'inclusion avec le médecin. Le but était de vérifier plus profondément les critères de non-inclusion (cf. annexe 4) ; d'expliquer (à nouveau) aux familles les tenants et les aboutissants de l'étude, ainsi que les contraintes et les risques liés à la participation au projet ; de vérifier les antécédents médicaux et les traitements médicamenteux (à l'aide du carnet de santé) ; de vérifier l'existence de pathologies neurologiques ou psychiatriques ; de vérifier la latéralité manuelle de l'enfant, à l'aide du questionnaire d'Edinburgh (Oldfield, 1971) ; et enfin de vérifier la signature des consentements éclairés officiels par les deux parents/tuteurs légaux informés et du médecin (cf. annexe 3), mais également de vérifier la 'signature' d'un consentement écrit de l'enfant informé (écrire son prénom et entourer le smiley 'oui' ou 'non'). Pendant l'examen IRM, afin de compléter nos données et 'd'occuper' les parents, ces derniers devaient remplir trois questionnaires différents : un portant sur le nombre d'heures passées devant la télévision/les jeux vidéo, un autre sur les données socio-économiques et un dernier portant sur l'évaluation comportementale des fonctions exécutives de l'enfant, appelé l'Inventaire d'Évaluation Comportementale des Fonctions Exécutives (BRIEF) (Gioia et al., 2000).

Après cette visite d'inclusion, les enfants étaient préparés et familiarisés avec l'examen IRM ainsi qu'à ses contraintes. Ici encore, tout le déroulement de l'examen IRM était rappelé aux enfants. D'abord, les contraintes liées à l'examen IRM étaient expliquées aux enfants, c'est-à-dire le fait que la machine fasse beaucoup de bruit et qu'il faille rester le plus immobile possible. Pour cela nous faisons écouter aux enfants les bruits de l'IRM préalablement enregistrés. Par la suite, l'enfant était 'entraîné' à rester immobile, cela se réalisait sous la forme d'un jeu appelé le « jeu de la statue ». Pendant ce jeu, l'enfant devait répondre à des questions tout en restant debout et parfaitement immobile. Ensuite nous présentions à l'enfant les deux jeux qu'il devait faire pendant les *runs* fonctionnels et nous lui expliquions les règles. Il devait également les faire plusieurs fois de suite (généralement deux fois) tout en continuant à faire la statue. Ensuite, l'enfant était installé dans un tunnel en tissu, appelé la fausse IRM, pour continuer à s'exercer aux jeux toujours en faisant la statue mais cette fois dans des conditions analogues à la vraie IRM. Toutes ces étapes

ont été répétées autant de fois que nécessaire jusqu'à ce que l'enfant soit parfaitement à l'aise et préparé.

## **b. IRM anatomique**

### **i. Acquisitions des données anatomiques**

Séquence anatomique T1 (durée : 9 minutes) : cette séquence 3D écho de gradient pondérée en T1 avait les paramètres suivants : temps de répétition 7,19 ms ; temps d'écho 3,29 ms ; angle de bascule de 9° ; matrice d'acquisition 256 x 240 x 176 ; orientation sagittale ; taille des voxels 1 mm isométrique ; champ de vue 25,6 cm ; 176 coupes sagittales de 1 mm.

Séquence anatomique T2\* (durée : 4 minutes) : cette séquence 2D écho de gradient pondérée en T2\* avait les paramètres suivants : temps de répétition 650 ms ; temps d'écho 20 ms ; angle de bascule 20° ; matrice d'acquisition 240 x 240 x 162,5 ; taille des voxels 1 mm ; champ de vue 24cm ; 65 coupes axiales contiguës de 2,5 mm.

Avant d'installer les enfants sur le lit de l'IRM, l'ensemble du dispositif et la manière dont ils allaient être installés (i.e. le rétroprojecteur à l'arrière de la machine, l'antenne de tête, le miroir permettant de voir l'écran, etc.) leur était présentée. Ensuite, les enfants étaient confortablement installés. Nous leur proposons de mettre un coussin sous leurs genoux (permettant de soulager le dos) et/ou de mettre une couverture sur leurs jambes. De plus, nous leur proposons systématiquement de mettre des boules quiès en plus du casque son, qui permettait de protéger les oreilles des enfants des bruits de la machine et de diffuser le son du dessin animé. Pour finir, un dispositif de sécurité, appelé une poire d'appel d'urgence, était mis à disposition des enfants. Ce dispositif permettait aux enfants de nous signaler une urgence à tout moment pendant l'acquisition IRM. Pendant les séquences pendant lesquelles l'activité cérébrale n'était pas enregistrée (i.e. IRMa et IRMd), l'enfant regardait le dessin animé de son choix (*Aladdin*, *Les Aristochats* ou *Là-Haut*). Ceci permettait aux enfants de rester calme tout au long de l'acquisition, mais également de rester beaucoup plus immobiles, et de leur faire vivre l'examen IRM de manière agréable.

## ii. Pré-traitements des données anatomiques

Les données anatomiques ont été prétraitées à l'aide du logiciel FreeSurfer 6.0. La reconstruction corticale et la segmentation volumétrique ont été effectuées à l'aide de la suite d'analyses d'images Freesurfer, documenté et disponible gratuitement en téléchargement en ligne (<http://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/>). Les détails techniques de ces procédures sont décrits dans des publications antérieures (Dale et al., 1999; Dale & Sereno, 1993; Fischl & Dale, 2000; Fischl et al., 2001; Fischl et al., 2002; Fischl et al., 2004a; Fischl et al., 1999a; Fischl et al., 1999b; Fischl et al., 2004b; Han et al., 2006; Jovicich et al., 2006; Segonne et al., 2004; Reuter et al., 2010, Reuter et al., 2012). En bref, ce traitement comprend la correction du mouvement et le calcul de la moyenne (Reuter et al., 2010) de plusieurs images pondérées T1 volumétriques (lorsque plusieurs images sont disponibles), l'élimination des tissus non cérébraux par une procédure de déformation hybride bassin/surface (Segonne et al., 2004), la transformation automatisée de Talairach, la segmentation de la substance blanche sous-corticale et les structures volumétriques de la matière grise profonde (y compris les hippocampes, l'amygdale, le noyau caudé, le putamen et les ventricules) (Fischl et al., 2002; Fischl et al., 2004a), la normalisation de l'intensité (Sled et al., 1998), la 'tessellation' de la limite de substance blanche de la matière grise, la correction automatique de la topologie (Fischl et al., 2001; Segonne et al., 2007) et la déformation de surface suivant les gradients d'intensité pour placer de manière optimale les frontières entre (1) la matière grise et blanche et (2) entre la matière grise et le liquide cébrospinal à l'endroit où le plus grand changement d'intensité définit la transition vers l'autre classe de tissu (Dale et al., 1999; Dale & Sereno, 1993; Fischl & Dale, 2000). Une fois que les modèles corticaux sont terminés, un certain nombre de procédures déformables peut être effectué pour le traitement et l'analyse des données, y compris l'inflation de surface (Fischl et al., 1999a), l'enregistrement dans un atlas sphérique basé sur des modèles de replis corticaux individuels. La parcellisation du cortex cérébral est faite en unités par rapport à la structure des gyri et sulcales (Fischl et al., 1999b; Desikan et al., 2006; Fischl et al., 2004b), mais également selon la création de diverses données de surface, y compris des cartes de courbure et de profondeur sulcale. Cette méthode utilise à la fois les informations d'intensité et de continuité du volume tri-dimensionnel MR dans les procédures de

segmentation et de déformation pour produire des représentations de l'épaisseur corticale calculée comme la distance la plus proche de la limite entre la surface de la matière grise et du liquide cébrospinal (Fischl & Dale, 2000). Les cartes sont créées à l'aide de gradients d'intensité spatiale à travers les classes de tissus et ne dépendent donc pas simplement de l'intensité du signal absolu. Les cartes produites ne sont pas limitées à la résolution des voxels des données originales et sont donc capables de détecter les différences submillimétriques entre les groupes. Les procédures de mesure de l'épaisseur corticale ont été validées par rapport à l'analyse histologique (Rosas et al., 2002) et à des mesures manuelles (Kuperberg et al., 2003; Salat et al., 2004). Il a été démontré que les procédures morphométriques de FreeSurfer démontrent une bonne fiabilité de test-retest parmi les fabricants de scanners et entre les champs (Han et al., 2006; Reuter et al., 2012).

Pour extraire des estimations fiables du volume et de l'épaisseur, les images sont automatiquement traitées avec une procédure spécialisée pour le traitement longitudinal dans FreeSurfer (Reuter et al., 2012). Plus précisément, un espace *template* intra-sujets corrigé et une image sont créés à l'aide d'un enregistrement cohérent inverse et robuste (Reuter et al., 2010). Plusieurs étapes de traitement, telles que le découpage du crâne, les transformations de Talairach, l'immatriculation de l'atlas ainsi que les cartes de surface sphériques et les parcellisations sont ensuite initialisées avec des informations communes issues du *template* intra-sujet, augmentant considérablement la fiabilité et la puissance statistique (Reuter et al., 2012). Les prétraitements longitudinaux de FreeSurfer visent à obtenir des mesures morphologiques corticales et sous-corticales robustes et plus fiables en incorporant des informations temporelles supplémentaires dans une série de données longitudinales. Cette procédure comporte trois étapes (cf. [surfer.nmr.mgh.harvard.edu/fswiki/FsTutorial/LongitudinalTutorial](http://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/fswiki/FsTutorial/LongitudinalTutorial)).

La première correspond au traitement classique réalisé pour des données transversales (CROSS). Dans la deuxième étape (BASE), un *template* corrigé est créé pour chaque sujet en utilisant les informations de tous ses points temporels. Il est possible de démarrer la construction du *template* qu'une fois la norme (*norm.mgz*) de tous les points temporels disponible. Par exemple dans notre étude, cette deuxième étape peut être réalisée uniquement si les images T1 du prétest

et du posttest sont traitées selon l'étape 1. Une fois le *template* entièrement traité, il est utilisé pour traiter les étapes longitudinales (étape 3). Certains résultats n'ont pas été initialisés, mais directement copiés à partir de ce *template* (masque cérébral, carte linéaire de Talairach, volume intracrânien total estimé eTIV). Ce *template* permet la construction d'un volume moyen ou médian qui prend en compte les changements de volume à chaque temps. Le schéma longitudinal nécessite ensuite d'aligner les données des images de tous les temps sur le *template*, ainsi tous les points temporels sont alignés sur un espace commun non biaisé. Ensuite la troisième étape (LONG) reprend les processus de l'étape 1 mais en se basant sur le *template* (donc les données de l'étape 2).

### iii. Analyses des données anatomiques

Les analyses comportementales ont été effectuées à l'aide du logiciel STATISTICA version 10 ([www.statsoft.fr](http://www.statsoft.fr)) et aussi à l'aide du logiciel JASP version 0.9 ([jasp-stats.org/](http://jasp-stats.org/)). Nous avons pu extraire les données cérébrales anatomiques grâce à un script FreeSurfer : `aparcstats2table`. Ce script permet d'importer les différents types de données anatomiques facilement dans un tableur et/ou un programme de statistiques. Nous pouvons extraire les données d'épaisseur corticale, de surface ou de volume (mm<sup>2</sup>). Il est aussi possible d'extraire au choix les données sur la base de deux atlas de parcellisation : l'atlas Desikan-Killiany (Desikan et al., 2006) ou Destrieux (Destrieux et al., 2010).

#### c. IRM fonctionnelle au repos

Séquence fonctionnelle au repos (durée : 5 minutes) : pendant cette séquence le dessin animé était coupé et les enfants avaient comme consigne : *de fermer les yeux et de laisser aller leurs pensées*. Cette séquence multi-écho de gradient avait les paramètres suivants : temps de répétition 2500 ms ; temps d'écho 13 ms ; angle de bascule 77° ; matrice d'acquisition 64 x 64 ;

champ de vue 240 x 240 x 127,5 mm ; 34 coupes axiales de 3,75 mm. La boîte d'acquisition était systématiquement positionnée parallèlement à l'axe commissure antérieure-commissure postérieure (i.e. CA-CP) du cerveau du participant.

#### **d. IRM fonctionnelle d'activation**

Séquence fonctionnelle d'activation (durée max 10 minutes) : les images étaient pondérées en T2\* et acquises avec une séquence echoplanar (EPI echo gradient). Cette séquence avait les paramètres suivants : temps de répétition de 2 secondes ; temps d'écho de 30 ms ; angle de bascule de 90° ; matrice de 64 x 64 ; champ de vue de 192 x 192 x 123 mm ; 41 coupes axiales d'épaisseur 3 mm. La boîte d'acquisition était systématiquement positionnée parallèlement à l'axe commissure antérieure-commissure postérieure (i.e. CA-CP) du cerveau du participant.

Avant le début de la séquence, un pad de réponse était mis à disposition des enfants, nous permettant d'enregistrer les réponses des participants. Les deux tâches ont été programmées à l'aide du logiciel E-Prime® 2.0. Les consignes ainsi que l'utilisation des boutons réponses ont été systématiquement rappelées aux enfants avant le début de chaque *runs*. Les consignes étaient les suivantes, (1) pour la tâche de DOT : *Dans ce jeu, tu vas voir une série de pastilles blanches apparaître l'une après l'autre dans une grille. Regarde-les bien et mémorise-les. Ensuite tu vas voir une grille orange et vide qui veut dire que tu dois attendre. Quand la grille redevient blanche, tu dois dire si le cercle qui apparaît est situé à la même place que l'une des pastilles que tu as vue avant. Pour répondre OUI, appuie sur le bouton GAUCHE (bouton lisse). Pour répondre NON, appuie sur le bouton DROIT (bouton rugueux). Parfois, tu vas voir une série de pastilles vertes apparaître l'une après l'autre. Regarde-les bien. Lorsqu'un cercle vert apparaît à la place, tu dois cliquer sur le bouton GAUCHE (bouton rugueux). Il y aura des séries de 3, 4, 5 ou 6 pastilles qui se suivront rapidement ou plus lentement. Souviens-toi d'appuyer sur le bouton aussi vite que possible sans te tromper.* ; (2) pour la tâche de stop-signal : *Quand tu vois une flèche pointant à GAUCHE, appuie sur le bouton GAUCHE (bouton lisse). Quand tu vois une flèche pointant à DROITE, appuie sur le bouton DROIT (bouton rugueux). Appuie sur le bouton aussi vite que possible sans faire d'erreur.*

*Mais quand tu entends un bip il faut que tu essaies de ne pas répondre. Tu n’y arriveras pas à chaque fois, c’est normal le jeu est fait pour ça. Mais continue à répondre le plus vite possible.*

#### **e. IRM de diffusion**

Séquence fonctionnelle de diffusion (durée : 7/8 minutes) : les images étaient pondérées en T2\* et acquises avec une séquence echoplanar (EPI echo gradient). Cette séquence avait les paramètres suivants : temps d’écho de 75 ms ; angle de bascule de 90° ; matrice de 128 x 128 ; champ de vue de 256 x 256 x 140 mm ; 70 coupes axiales d’épaisseur 2 mm. La boîte d’acquisition était systématiquement positionnée parallèlement à l’axe commissure antérieure-commissure postérieure (i.e. CA-CP) du cerveau du participant. Pendant cette séquence, la suite du dessin animé était diffusée aux enfants.

### **III. Évaluations cognitives**

L’évaluation cognitive correspond à une batterie de tests cognitifs nous permettant d’avoir un profil exécutif complet des enfants, ainsi que de mesurer les différences de performances entre le prétest et le posttest induites par l’entraînement sur tablette tactile. Cette évaluation cognitive se déroulait soit à l’école de l’enfant, soit à son domicile, soit dans les locaux de CYCERON pendant en moyenne deux heures. Malgré le fait que cette batterie de tests cognitifs soit appelée ici évaluation cognitive, elle n’a bien-sûr jamais été présentée de cette manière aux enfants. Il leur a été expliqué que ces différents jeux allaient nous permettre de connaître leurs points forts et leurs points faibles et qu’ils trouveront (peut-être) certains jeux très faciles et d’autres plus difficiles. Une partie des tâches cognitives était des tests papiers-crayon, et l’autre partie était constituée des tests informatisés. Ces derniers ont été programmés en intégralité avec le logiciel E-Prime® 2.0. Cette batterie cognitive comprenait de multiples tests cognitifs, cependant nous n’en présenteront ici qu’une partie. Les enfants des deux groupes ont passé aux deux temps de l’étude

(1) la tâche de Stroop et de stop-signal, afin de mesurer les améliorations aux tâches entraînées ; (2) les tâches des réseaux de l'attention (ANT) et Simon, afin de mesurer les effets de transfert proche ; et (3) la tâche de mémoire de travail *n-back* et deux tâches évaluant les apprentissages scolaires : les capacités arithmétiques et grammaticales (cf. Lubin et al., 2013; Lanoë et al., 2016) afin de mesurer les effets de transfert lointain. La tâche des réseaux de l'attention, appelée également tâche de Flanker ou ANT, consiste à identifier l'orientation d'une flèche située au centre d'un groupe d'autres flèches qui peut être congruente (e.g. > > > > > >) ou incongruente (e.g. > > < > > >). La tâche de Simon consiste à appuyer le plus rapidement possible sur le bouton correspondant à l'image qui apparaît à différents endroits sur l'écran (e.g. appuyer sur le bouton grenouille quand une grenouille apparaît à l'écran).

#### **IV. Entraînements sur tablette tactile**

Afin d'analyser les effets de l'entraînement au contrôle inhibiteur, les participants ont été séparés semi-aléatoirement (afin d'équilibrer le nombre de filles/garçons dans les groupes) en deux groupes distincts (N = 30), différenciés par l'apprentissage suivi. Les enfants ont suivi un entraînement sur tablettes tactiles de 15 minutes par jour, 5 jours par semaine pendant 5 semaines. Les tablettes tactiles ont été utilisées afin de pouvoir travailler avec un outil nous permettant de mesurer de manière objective et précise les données des entraînements. Elles nous permettaient également de fournir (quel que soit le statu socio-économique des familles volontaires) un outil fiable, ludique et attractif pour les enfants. Elles permettaient aussi de suivre l'entraînement des participants dans des conditions expérimentales les plus similaires possibles. Elles ont été prêtées aux enfants pendant les 5 semaines d'entraînement, et elles leur étaient remises une fois l'évaluation cognitive du prétest terminée. Les entraînements ont été programmés à l'aide du logiciel E-Prime® 2.0. Chaque entraînement comportait deux tâches d'environ 7 minutes, afin que l'entraînement dure 15 minutes au total. Toutes les tâches ont une difficulté croissante et s'adaptent au jour le jour aux performances de l'enfant. Elles fournissent

toutes également un *feedback* des performances à l'enfant, c'est-à-dire le nombre de points gagnés et des informations sur sa progression ou sa régression. À la fin de chaque séance d'entraînement, l'enfant (accompagné de ses parents pour avis extérieur) devait remplir un 'journal de bord' nous permettant de savoir au jour le jour s'il était concentré, s'il s'est entraîné dans le calme et s'il était motivé. Il pouvait aussi noter s'il y a eu un problème quelconque pendant la séance, comme par exemple un bug avec la tablette.

### **a. Le groupe contrôle actif**

L'un des deux groupes est un groupe contrôle dans lequel les enfants devaient répondre à des questions de vocabulaire et de culture générale (de type Les Incollables®), il est appelé le groupe CA (cf. annexe 5 a). L'entraînement comprenait deux jeux d'environ 7 minutes appelés : 'Le Jeu des Questions générales' et 'Le Jeu des Questions spécifiques'. Chaque bloc contenait 10 questions. Si la réponse donnée par le participant était incorrecte, la bonne réponse lui était présentée et cette question était à nouveau reproposée à la prochaine séance (si le participant restait au même niveau). Les enfants avaient un délai maximum de réponse de 30 secondes. Pour les deux jeux, la difficulté était adaptative sur 8 niveaux, (1) le niveau était validé si le nombre de bonnes réponses était  $\geq 90\%$  dans un bloc (i.e. 1 erreur maximum par bloc) et induisait un passage au niveau supérieur pour le bloc suivant ; (2) si le nombre de bonnes réponses était  $< 70\%$ , le participant redescendait au niveau inférieur pour le bloc suivant ; et enfin (3) entre les deux ( $\geq 70\%$  mais  $< 90\%$ ), le participant restait au même niveau pour le bloc suivant.

### **b. Le groupe contrôle inhibiteur**

Le deuxième groupe suivait un entraînement 'pur' au contrôle inhibiteur, il est appelé le groupe CI (cf. annexe 5 b et c). Cet entraînement comportait deux tâches : la tâche du Stroop et la tâche de stop-signal d'environ 7 minutes chacune. Le premier jeu était appelé 'Le jeu des mots et des couleurs' et correspond à la tâche de Stroop classique. Chaque bloc comportait 39 essais chacun. Il y avait trois types de catégories d'essais : (a) les items congruents, où la couleur de

l'encre était identique au mot écrit (i.e. BLEU) ; (b) les items incongruents, où la couleur de l'encre était différente du mot écrit (i.e. BLEU) ; et enfin les items contrôle, où le mot était écrit en noir et où l'enfant devait lire le mot écrit, par exemple pour le stimulus suivant : BLEU l'enfant devait répondre 'bleu'. La difficulté était adaptative sur 8 niveaux : (1) le niveau était validé si le nombre d'essais corrects était  $\geq 90\%$  dans un bloc (3 erreurs par bloc maximum) et induisait un passage au niveau supérieur pour le bloc suivant ; (2) si le nombre d'essais corrects était  $\leq 70\%$ , le participant redescendait au niveau inférieur pour le bloc suivant ; et enfin (3), entre les deux ( $> 70\%$  mais  $< 90\%$ ), le participant restait au même niveau pour le bloc suivant. Entre les différents niveaux le temps de présentation entre deux stimuli variait (appelé Stimulus Onset Asynchrony ou SOA) : le SOA augmentait de 50 ms, c'est-à-dire que le premier niveau correspondait à un SOA de 450 ms et le dernier niveau à un SOA de 100 ms. Le deuxième jeu, appelé 'Le jeu du signal stop', correspond à la tâche de stop-signal classique. Les enfants commençaient chaque session d'entraînement par 16 essais d'items Go. Chaque bloc comprenait 40 essais chacun. Ce jeu contenait donc deux types de stimuli : les items Go (75% des essais, soit 30 par bloc) et les items Stop (25% des essais, soit par bloc). La difficulté était ici encore adaptative et répartie sur 8 niveaux : (1) le niveau était validé si plus de 80% des essais Stop étaient réussis et si plus de 90% de Go étaient réussis (afin d'éviter que le participant ne progresse dans les niveaux en n'exécutant pas la tâche) et induisait un passage au niveau supérieur pour le bloc suivant ; (2) si le nombre d'essais Stop corrects était  $< 60\%$ , le participant redescendait au niveau inférieur pour le bloc suivant, il en était de même si le nombre de Go corrects était inférieur à 80% ; et enfin (3) si le nombre de Stop corrects était compris entre 60 à 80%, le participant restait au même niveau pour le bloc suivant. Entre les différents niveaux, le SSD augmente de 50 ms, soit pour le premier niveau le SSD était de 100 ms et pour le dernier niveau de 450 ms. Effectivement, plus le SSD est long, plus la tâche est difficile à réaliser.

# ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

## **Étude n°1 : Étude des effets de transferts induits par un entraînement intensif au contrôle inhibiteur chez des enfants d'âge scolaire**

### **I. Introduction**

Les fonctions exécutives sont un ensemble de processus cognitifs impliqués dans le fonctionnement cognitif, le contrôle comportemental et les interactions sociales. Ils jouent aussi un rôle de prédicteur dans la réussite scolaire et professionnelle (Dennis, 1989; Blair & Razza, 2007; Carlson & Moses, 2013; Kim et al., 2013) mais également dans la santé mentale et physique, ou encore la richesse et la qualité de vie (Moffitt et al., 2011; Reinert et al., 2013; Bull & Lee, 2014; Cragg & Gilmore, 2014; Liang et al., 2014).

De par leur importance dans des domaines nombreux et variés, plusieurs études ont tenté d'étudier les effets de l'entraînement des fonctions exécutives (Jaeggi et al., 2008; Karbach & Kray, 2009; Thorell et al., 2009; Berkman et al., 2014; Karbach & Unger, 2014; Au et al., 2015; Liu et al., 2015; Traverso et al., 2015; Wilkinson et al., 2015; Homer et al., 2017; Souders et al., 2017). En effet, plusieurs études précurseurs ont démontré les effets bénéfiques d'un entraînement aussi bien au niveau comportemental qu'au niveau cérébral. Par exemple dans l'étude de l'équipe de Draganski et coll. (2004), suite à un apprentissage au jonglage, les adultes présentent de meilleures compétences pour cette performance. Les chercheurs observent un changement au niveau cérébral anatomique entre les deux temps de l'étude (i.e. avant et après l'entraînement). Dans une autre étude, les chercheurs démontrent un changement anatomique cérébral chez des

étudiants en médecine pendant leur période de révisions (Draganski et al., 2006). Les résultats montrent une augmentation du volume de matière grise au niveau du cortex pariétal et des hippocampes. L'apport de ces études permet donc de conclure que la plasticité cérébrale est une caractéristique du système nerveux qui peut évoluer pour faire face aux changements de l'environnement. Par ailleurs, il est essentiel d'étudier la capacité qu'a notre cerveau à s'adapter, ce qui implique de comprendre les changements dans la structure anatomique du cerveau résultant de l'apprentissage et de l'adaptation.

Ces effets bénéfiques de l'entraînement sont, par conséquent, prometteurs et ont encouragé les chercheurs à étudier l'apprentissage des fonctions exécutives chez des individus souffrant d'un déficit cognitif suite à une lésion ou chez des enfants souffrant de difficultés scolaires. Par exemple, chez les enfants atteints de TDAH qui présentent un déficit exécutif touchant les capacités de flexibilité cognitive, de mémoire de travail et d'inhibition, des chercheurs ont tenté d'examiner si un entraînement à la flexibilité cognitive induisait une amélioration de ces fonctions exécutives (Kray et al., 2012). Les enfants ont montré des améliorations dans les tâches de flexibilité cognitive, c'est-à-dire une réduction du coût de la flexibilité cognitive (i.e. switching en anglais). Ce type d'étude permet de mieux comprendre la mise en place des fonctions exécutives et surtout les nombreuses différences intra et interindividuelles en terme de performances cognitives. Effectivement, celles-ci sont impliquées dans de multiples aspects comme les apprentissages scolaires, le succès au travail et la santé mentale et physique. L'enjeu est donc de taille. Suivant les résultats, il sera certainement possible de pouvoir 'prescrire' des interventions ciblées au début de l'apprentissage (i.e. pendant l'enfance, notamment en classe) ou suite à des déficits cognitifs (i.e. vieillissement cognitif). Une étude en imagerie en TEP a démontré qu'un entraînement chez l'adulte de seulement quelques minutes permet d'améliorer les performances des participants face à un problème de raisonnement (Houdé et al., 2000). D'autres études réalisées chez des enfants ont prouvé l'implication des capacités inhibitrices dans la célèbre tâche de conservation du nombre de Jean Piaget par exemple (Houdé et al., 2011). Les résultats démontrent une différence d'activation cérébrale entre les enfants qui réussissent la tâche, appelés conservants, comparés aux enfants qui ne la réussissent pas, appelés non-

conservants. Les enfants conservants activent simultanément le cortex pariétal, impliqué dans le traitement du nombre, et le gyrus frontal inférieur droit, impliqué dans l'inhibition. D'autres études encore prouvent l'implication du contrôle inhibiteur dans certains apprentissages scolaires (Lubin et al., 2013 & 2016; Lanoë et al., 2016), plus particulièrement dans l'apprentissage des mathématiques ou de la grammaire. Le point commun entre ces deux apprentissages réside dans la capacité d'inhiber une heuristique trompeuse sur-apprise au profit d'une réponse logique. L'entraînement des capacités inhibitrices semble donc une solution très encourageante pour prescrire des interventions pédagogiques et aider des enfants ayant des déficits cognitifs. Le but de l'étude que nous menons est d'étudier les effets de l'entraînement au contrôle inhibiteur 'pur' sur tablette tactile (de 15 minutes par jour, 5 jours par semaine et pendant 5 semaines) chez des enfants âgés entre 9 et 10 ans en comparaison à un groupe contrôle.

## II. Matériels et méthodes

**Participants.** Les enfants ont été recrutés dans les classes des écoles primaires élémentaires aux alentours de la ville de Caen (Calvados). Ils avaient tous entre 9 et 10 ans (moyenne : 9,79 ans  $\pm$  0,56). L'échantillon comporte au total 66 enfants dont 33 enfants dans le groupe contrôle actif, appelé groupe CA (19 filles, moyenne : 9,93  $\pm$  0,58) et 33 enfants dans le groupe suivant l'entraînement au contrôle inhibiteur, appelé groupe CI (19 filles, moyenne : 9,65  $\pm$  0,50).

**Entraînements.** Les enfants ont tous suivi un entraînement de 5 semaines et de 15 minutes par jour, 5 jours par semaine sur tablette tactile et à domicile. Le groupe CA a répondu à des questions de culture générale réparties en deux jeux distincts, dont la difficulté était adaptative aux performances des enfants avec 8 niveaux de difficulté. Le groupe CI a suivi un entraînement à la tâche de Stroop classique et à la tâche de stop-signal. Ici aussi, la difficulté était adaptée aux performances des enfants avec 8 niveaux de difficulté.

**Batterie pré et posttest.** Les batteries de tests cognitifs ont été réalisées soit dans les locaux de l'école primaire, soit au domicile de l'enfant. L'intégralité des tâches a été programmée à l'aide du logiciel E-Prime® 2.0, elles sont donc toutes informatisées. Les enfants ont tous passé la batterie

de tests seul avec un expérimentateur, dans une salle au calme. L'expérimentateur expliquait oralement les règles des jeux, et les boutons réponses tout en s'assurant que l'enfant soit parfaitement concentré et qu'il ait compris les instructions. Les tâches sélectionnées par intérêt pour les analyses statistiques font en réalité partie d'une batterie cognitive complète. Une partie de ces tâches nous a permis de mesurer les effets de transfert proche, grâce à la tâche de Flanker (ANT) et à la tâche Simon. Une autre partie nous a permis d'évaluer les effets de transfert lointain, grâce à la tâche de *n-back* (allant jusqu'à 3 *backs*) et à deux tâches évaluant les capacités scolaires arithmétiques et de grammaire.

**Les tâches entraînées.** La tâche de Stroop (3'30 minutes) comporte 16 stimuli (soit 4 éléments congruents et 12 éléments incongruents) combinant quatre noms de couleur différents (rouge, vert, bleu et jaune) avec les quatre couleurs d'encre correspondantes (codes de couleur RVB: 255; 0; 0; 0; 255; 0; 0; 0; 255 et 255; 255; 0). Les éléments étaient affichés au centre de l'écran en mode Courier gras 24 points sur un fond gris (code RVB 135; 135; 135). Les participants ont été invités à identifier la couleur d'encre du mot affiché en appuyant sur l'un des deux boutons du clavier avec leurs index gauche et droit : les touches "S" pour les couleurs jaune et bleue et "L" pour les couleurs rouge et verte du clavier de l'ordinateur. Les touches étaient signalées par des autocollants de couleurs correspondant. Chaque essai commençait par la présentation d'une croix de fixation noir sur un fond gris pendant 1500 ms. Ensuite, l'un des mots de couleur était affiché pendant une durée maximale de 3000 ms. Les participants ont réalisé un bloc de 64 essais expérimentaux et deux blocs d'essais d'entraînement. Dans le premier bloc, les participants ont appris à associer chaque bouton de réponse à la couleur correspondante en appuyant sur la touche du clavier correspondant au point de couleur présenté à l'écran (chaque point de couleur a été présenté deux fois pour un total de 8 essais). Dans le deuxième bloc, 6 éléments de Stroop congruents et 6 éléments incongruents étaient présentés aux participants et ils ont reçu des commentaires concernant l'exactitude de leurs réponses. La présentation des essais a été randomisée dans les trois blocs d'essais. Nous avons séparément mesuré les temps de réponse (TR) des essais congruents et incongruents correctement effectués pour chaque participant. Nous avons ensuite calculé pour chaque participant un score d'interférence, c'est-à-dire une

soustraction entre le temps des réponses moyen aux items incongruents et le temps de réponses moyen aux items congruents. Un score faible reflète de bonnes capacités inhibitrices.

*La tâche de stop-signal* (8'00 minutes) comporte deux types de stimuli : les items go (75% des essais) et stop (25%). Les enfants avaient pour consigne : "*Appuie sur le bouton gauche de la souris quand la flèche pointe à gauche, et à droite si elle pointe à droite. Le plus rapidement possible, et sans faire d'erreurs. Sauf quand tu entends un bip. Tu n'y arriveras pas à chaque fois, c'est normal le jeu est fait pour ça. Mais continue à répondre le plus vite possible*". Chaque essai commençait par la présentation d'un cercle (250 ms). Une flèche a ensuite été présentée à l'intérieur du cercle et les participants ont été priés d'appuyer aussi rapidement que possible sur le bouton gauche de la souris lorsque celle-ci était dirigée vers la gauche et le bouton droit de la souris lorsque la flèche était dirigée vers la droite, à moins qu'un signal auditif (c'est-à-dire, un signal d'arrêt, 750 Hz, 75 ms) n'ait été présenté avec des délais variables (c'est-à-dire, retard du signal d'arrêt, SSD) et après la présentation de la flèche. Le délai entre la présentation de la flèche et le signal d'arrêt a commencé à 250 ms et a augmenté de 50 ms après chaque item stop réussi (délai jusqu'à 1150 ms) et diminué de 50 ms après chaque échec (jusqu'à 50 ms). Chaque essai durait 2000 ms et les participants pouvaient donner leur réponse pendant toute la durée de l'essai. Les participants ont d'abord réalisé un bloc de 32 essais (8 essais stop et 24 essais Go), puis trois blocs de 64 essais expérimentaux (16 essais stop et 48 essais Go par bloc). Dans la moitié des essais, la flèche pointait vers la gauche. Pour chaque participant, nous avons calculé l'indice SSRT (Aron & Poldcrack, 2006), la médiane des temps de réponses des items go réussis et la moyenne des SSD. Un score faible reflète de bonnes capacités inhibitrices.

***Les tâches de transfert proche.*** Pour la tâche ANT (4'00 minutes), les enfants avaient pour consigne : "*Appuie sur le bouton gauche de la souris quand le poisson du milieu nage à gauche et à droite quand il nage à droite. Le plus rapidement possible, et sans faire d'erreurs*". Au centre des poissons, il y avait une flèche afin de pouvoir en déterminer le sens (i.e. gauche ou droite). Un groupe de 5 poissons était présenté, dont le sens du poisson du milieu déterminait le type de stimuli : incongruents ou congruents. Pour les stimuli incongruents, le sens du poisson du milieu était différent de celui des 4 autres, et pour les stimuli congruents le sens du poisson du milieu

était identique de celui des autres. Il y avait aussi des stimuli neutres qui ne comportaient qu'un seul poisson. La couleur du fond de l'écran était cyan et celle des poissons était jaune. Les participants commençaient la tâche par 8 essais d'entraînements, afin de se familiariser avec les stimuli visuels et avec les boutons réponses. Pendant la condition test, il y avait 48 essais randomisés. Avant chaque essai il y avait une croix de fixation pendant 250 ms. Les participants avaient 1700 ms pour répondre.

Pour *la tâche Simon* (2'00 minutes), les enfants avaient pour consigne : "*Appuie sur le bouton papillon avec ton index gauche quand tu vois un papillon apparaître sur l'écran de l'ordinateur, ou sur le bouton grenouille avec ton index droit quand tu vois une grenouille. Le plus rapidement possible, et sans faire d'erreurs*". Il y avait donc deux types de stimuli visuels : le papillon, sur la touche P du clavier et la grenouille sur la touche E de clavier. Les six premiers essais de la tâche commençaient par un entraînement où l'animal apparaissait au centre de l'écran de l'ordinateur et où le participant devait cliquer sur la touche du clavier correspondant. Ensuite, et pendant 8 autres essais d'entraînement, les stimuli visuels apparaissaient à droite ou à gauche de la croix de fixation. Pendant la condition de test il y avait 48 essais randomisés (liste de 12 essais répétée 4 fois). Cette tâche comprenait deux types de stimuli : incongruents, où l'animal apparaissait de l'autre côté de l'écran par rapport à la touche réponse du clavier ( $n = 6$ ) et congruents, où l'animal apparaissait sur l'écran du même côté par rapport à la touche réponse du clavier ( $n = 6$ ). La croix de fixation durait 500 ms et ensuite, les enfants avaient 750 ms pour donner leur réponse.

**Les tâches de transfert lointain.** Pour *la tâche n-back* (5'00 minutes), il y avait trois niveaux : 1, 2 et 3 *backs* (ou N1, N2 et N3). Les enfants devaient utiliser la souris de l'ordinateur pour donner leurs réponses. S'ils devaient répondre "oui", ils devaient utiliser le bouton gauche de la souris et s'ils devaient répondre "non", il fallait utiliser le bouton de droite. Pour chaque niveau ils avaient 6 essais d'entraînement et ensuite, il y avait respectivement 21, 22 et 23 essais pour les niveaux N1, N2 et N3. La croix de fixation durait 2500 ms. La durée d'apparition des stimuli était de 500ms avec la possibilité de répondre jusqu'à 2900ms au total. Les carrés (gris foncé) pouvaient avoir comme position sur l'écran de l'ordinateur : gauche haut/bas/milieu, droite haut/bas/milieu,

centre haut/bas/milieu. Les enfants avaient comme consigne de répondre à la question suivante : *"est-ce que le carré qui apparaît sur l'écran de l'ordinateur est situé à la même place que celui qui est apparu il y a 1, 2 ou 3 carrés ?"*

Pour la tâche de problèmes arithmétiques (6'00 minutes) (Lubin et al., 2013), nous avons conçu trois types de stimuli : les problèmes incongruents ( $n = 8$ ), congruents ( $n = 16$ ) et neutres ( $n = 8$ ). Chaque problème consistait en trois phrases présentées visuellement (en caractères Arial noirs à 24 points sur un fond gris). Deux de ces phrases présentaient des informations liées à un problème et qui spécifiaient (a) le nombre d'objets d'un protagoniste et (b) le nombre d'objets d'un protagoniste par rapport à l'autre protagoniste. La troisième indiquait une réponse possible au problème. Deux types de terme ont été utilisés dans les trois types de problème : "plus que" et "moins que". Étant donné que nous étions intéressés par la capacité à inhiber les stratégies trompeuses indépendamment de la capacité à effectuer des opérations arithmétiques complexes, nous avons utilisé des opérations simples (addition ou soustraction) impliquant des nombres tous multiples de 5. Dans les problèmes incongruents, les termes utilisés entraient en conflit avec les opérations arithmétiques à réaliser pour résoudre ces problèmes. L'heuristique ajouter s'il y a "plus que" ou soustraire s'il y a "moins que" doit être inhibée. Dans les problèmes congruents, les termes utilisés et les opérations arithmétiques étaient congruents. La stratégie requise pour résoudre les problèmes congruents était celle qui devait être inhibée pour résoudre les problèmes incongruents. Enfin, pour les problèmes neutres, les participants devaient simplement comparer le nombre de protagonistes de la recherche d'objets possédés pour résoudre le problème. Tous les participants ont d'abord effectué 4 essais pratiques pour se familiariser avec les 3 types de problèmes et les boutons réponse. Les trois types de problème ont été présentés sous forme de blocs — l'ordre des trois blocs étant contrebalancé entre les participants — afin d'éviter les effets d'amorçage. Pour les essais de test, l'item prime était un problème incongruent et l'item probe était un problème congruent. Pour les essais contrôle, l'item prime était un problème neutre, et l'item probe était un problème congruent. Ce paradigme a été conçu de telle sorte que lors des essais de test, l'heuristique trompeuse à résister (c'est-à-dire à inhiber) afin de résoudre le problème principal est devenue l'heuristique appropriée pour résoudre le problème probe.

Inversement, dans les essais contrôles, la stratégie nécessaire pour résoudre le problème prime n'était pas liée à la stratégie requise pour le problème probe. Par exemple, au cours des essais, les participants devaient résister à l'addition (25+5) pour se rendre compte que la soustraction (25-5) était nécessaire pour le problème incongruent, qui servait de prime. Immédiatement après l'amorce, un item probe a été présenté et les participants ont dû effectuer une addition (25+5) pour résoudre le problème congruent. Lors des essais contrôles, les problèmes neutres qui servaient de prime ; il était demandé aux participants de comparer le nombre d'objets des protagonistes (25>10). Pour l'item probe suivant, les participants ont résolu un problème congruent similaire à celui présenté dans les essais primes (25+10). En ce qui concerne les problèmes primes et probes, les participants devaient indiquer si la troisième phrase était correcte en appuyant sur le bouton gauche de la souris, ou si elle était fautive en appuyant sur le bouton droit de la souris. Le problème est resté à l'écran jusqu'à ce que les participants appuient sur l'un des deux boutons de réponse. Nous avons conçu 8 ordres possibles d'essais en faisant varier le prénom des protagonistes, la nature des objets (billes, boules, etc.) et les quantités (première quantité entre 25 et 40, deuxième quantité entre 5 et 20 et total entre 5 et 60) utilisés dans les problèmes. À chaque essai, les problèmes ne contenaient jamais les mêmes prénoms, les mêmes protagonistes ni les mêmes objets pour éviter toute confusion. La moitié des essais utilisait la terminologie "plus que" et l'autre moitié utilisait la terminologie "moins que". Nous avons utilisé comme score le taux de bonnes réponses aux problèmes incongruents, c'est-à-dire le nombre de bonnes réponses divisé par le nombre de problèmes incongruents, nous donnant un score compris en 0 et 1, pour lequel un score de 1 correspond à 100% de bonnes réponses. Plus ce score est élevé, plus le nombre de bonnes réponses est grand.

Pour la tâche *grammaticale* (4'00 minutes) (Lanoë et al., 2016), tous les participants ont commencé avec six essais d'entraînement (3 essais et 3 essais de contrôle) avec des paires d'éléments permettant de se familiariser avec les trois types de stimuli (12 items primes incongruents, 16 items primes congruents et 8 items congruents probes) ainsi qu'avec les boutons de réponse. Nous avons présenté les trois types d'éléments en blocs – avec l'ordre des trois blocs équilibré entre les participants – pour éviter les effets d'amorçage. Ensuite, les participants ont

réalisé 16 essais expérimentaux avec des paires d'éléments. Aucun retour ne leur a été donné sur leurs réponses. Ils ont effectué 8 essais et 8 essais contrôle dans un ordre aléatoire. Pour les essais test, un item prime incongruent était précédé d'un item probe. Dans les essais contrôle, un item prime congruent était précédé d'un item probe. Pour les essais test, les participants devaient bloquer (c'est-à-dire inhiber) l'heuristique où il faut ajouter un -s après un déterminant pluriel pour les items primes et activer cette heuristique pour répondre aux items probes. À l'inverse, dans les essais contrôle, les items primes n'imposaient pas aux participants d'inhiber l'heuristique où il faut ajouter un -s après un déterminant pluriel. Les participants avaient pour consigne d'appuyer sur le bouton gauche si la phrase n°1 disposée en haut de l'écran était correcte, ou sur le bouton de droite si la phrase n°2 disposée en bas de l'écran était correcte. Les phrases sont restées à l'écran jusqu'à ce que les participants appuient sur l'un des deux boutons de réponse dans un délai de 10 secondes. Nous avons enregistré les temps de réponse depuis le début des phrases jusqu'à ce que le bouton soit enfoncé. Nous avons conçu 2 ordres possible d'essais en modifiant la position de la phrase (en haut ou en bas) et l'ordre entre les essais contrôle et de test. Pour éviter toute confusion, les phrases présentées au premier degré ne contenaient jamais les mêmes verbes et noms que les phrases présentées dans les items probes. Nous avons utilisé comme score le taux de bonnes réponses aux items primes incongruents, c'est-à-dire le nombre de bonnes réponses divisé par le nombre d'items primes incongruents, nous donnant un score compris en 0 et 1 pour lequel un score de 1 représente 100% de bonnes réponses. Plus ce score est élevé, plus le nombre de bonnes réponses est grand.

**Analyses.** Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA version 10 ([www.statsoft.fr](http://www.statsoft.fr)), et à l'aide du logiciel JASP version 0.9 ([jasp-stats.org/](http://jasp-stats.org/)).

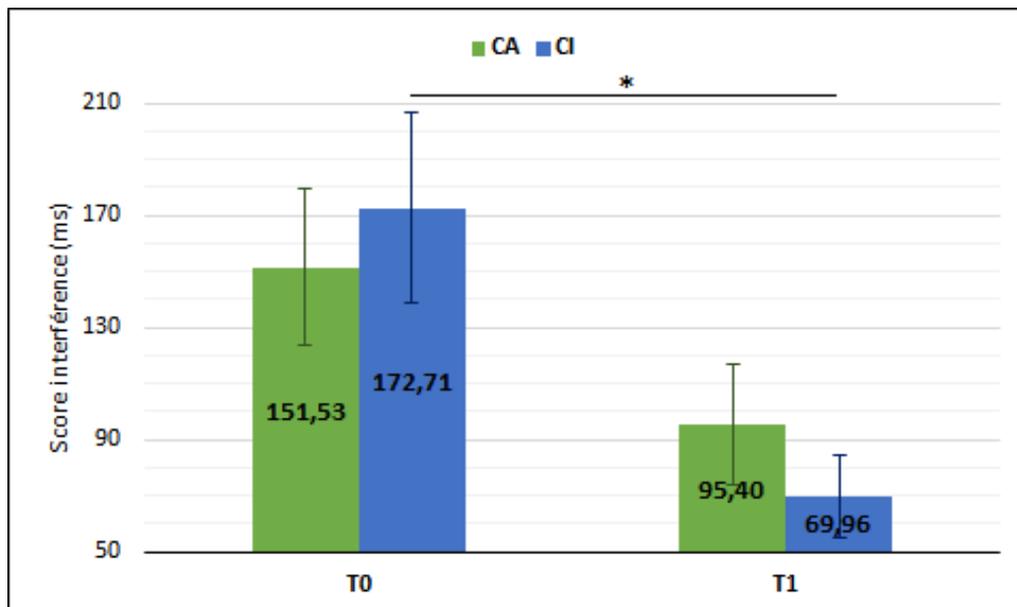
### III. Résultats

Les données extrêmes ont été retirées en fonction de la droite de Henry, permettant d'identifier les points atypiques à retirer des analyses et également d'évaluer la normalité de la distribution des variables. Nous avons effectué des analyses de variance à mesures répétées à

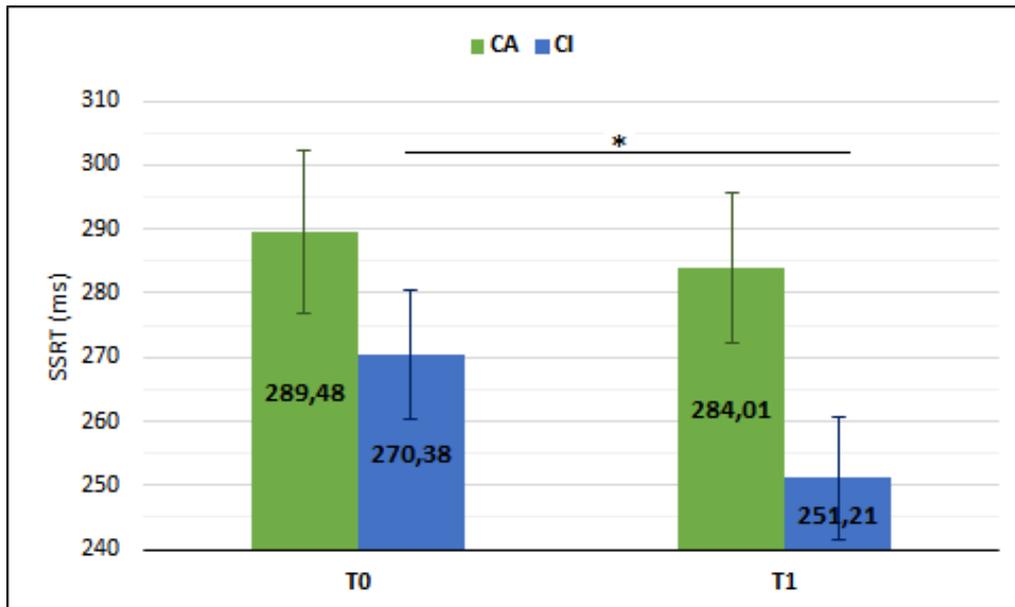
deux facteurs : groupes d'entraînement (CA/CI) et temps de l'étude (pré/posttest). Ces analyses n'ont pas été corrigées par l'âge, dû au faible écart d'âge entre les enfants (9-10 ans). Nous avons cependant ajouté le sexe comme covariable, afin de contrôler la disproportion dans la répartition des sexes dans les deux groupes.

**Performances aux tâches entraînées.** Pour la tâche de Stroop, les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées sur le score d'interférence, démontrent un effet simple entre les deux temps de l'étude (pratiquement) significatif  $F(1,57) = 3,80; p = 0,055; \eta^2 = 0,062$  (cf. Figure 12). Les analyses post-hoc de Bonferroni montrent une baisse significative du score d'interférence, uniquement pour le groupe CI, entre le pré et le posttest ( $p = 0,014; d = 0,446$ ).

Pour la tâche de stop-signal, les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées sur le score SSRT, démontrent un effet simple significatif entre les deux groupes d'entraînement significatif  $F(1,62) = 4,47; p = 0,039; \eta^2 = 0,067$  (cf. Figure 13). Les analyses post-hoc de Bonferroni montrent une différence significative, uniquement au posttest, entre les deux groupes ( $p = 0,040; d = 0,157$ ). Les enfants du groupe CI ont un SSRT plus faible que les enfants du groupe CA.



**Figure 12 :** Score d'interférence et SEM à la tâche de Stroop en millisecondes selon le groupe d'entraînement (CA/CI) et selon le temps de l'étude (pré/posttest)(\*  $p < .05$ ).

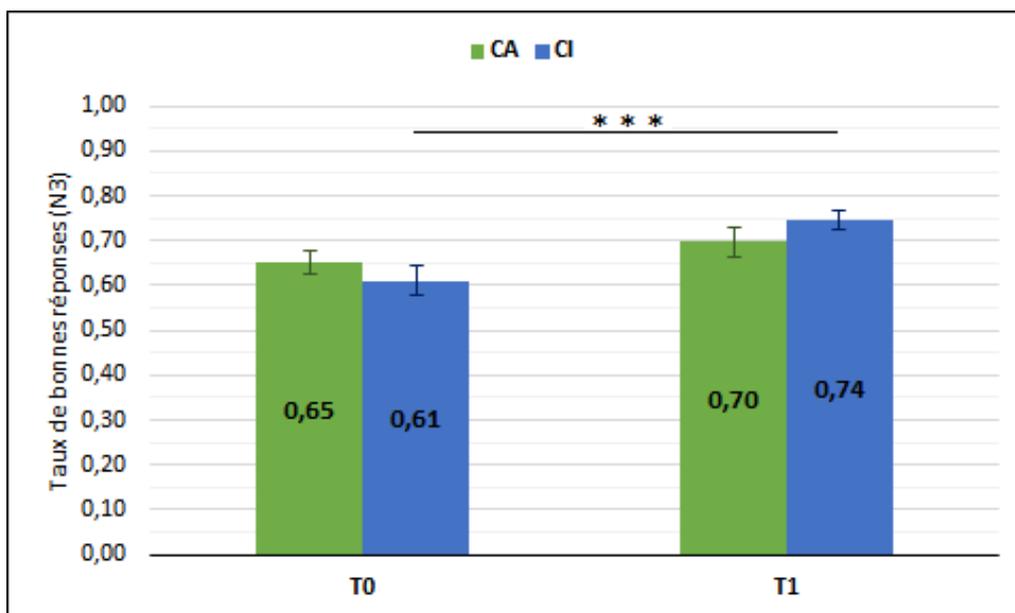


**Figure 13** : Score SSRT (Stop-signal reaction time) et SEM en millisecondes entre les deux groupes (CA/CI) et aux deux temps de l'étude (pré/posttest)(\*  $p < .05$ ).

**Performances aux tâches de transfert proche.** Pour la tâche ANT, les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées sur le score de conflit (i.e. temps de réponse moyen aux bonnes réponses aux items incongruents moins celui aux items congruents) ne démontrent aucun effet significatif ( $F > 1$ ;  $ps > 0,101$ ). Cependant il est important de souligner que, d'un point de vue descriptif, le score de conflit diminue pour les enfants des deux groupes entre le pré et le posttest (cf. Tableau 1, p. 100). Cette baisse est le reflet d'une amélioration des performances pendant la tâche. Ensuite, nous avons examiné le taux de bonnes réponses aux items congruents et incongruents. Les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées n'indiquent aucun effet significatif. D'un point de vue descriptif, le taux de bonnes réponses à ces deux types d'items ne varie pas entre le pré et le posttest pour les deux groupes d'entraînements.

Pour la tâche Simon, à nouveau, les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées sur le score de conflit (i.e. le temps de réponses moyen aux bonnes réponses des items incongruents moins celui des items congruents) ne démontrent aucun effet significatif ( $F > 1$ ;  $ps > 0,119$ ).

**Performance aux tâches de transfert lointain.** Pour la tâche de mémoire de travail *n-back*, les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées sur le taux de bonnes réponses, démontrent que pour tous les niveaux, c'est-à-dire 1-, 2- et 3-backs, il y a un effet simple entre les deux temps de l'étude (N1 :  $F(1,57) = 5,92$ ;  $p = 0,018$ ;  $\eta^2 = 0,124$  ; N2 :  $F(1,59) = 9,84$ ;  $p = 0,003$ ;  $\eta^2 = 0,367$  et N3 :  $F(1,55) = 7,60$ ;  $p = 0,008$ ;  $\eta^2 = 0,110$ ). Le taux de bonnes réponses aux trois niveaux augmente entre les deux temps de l'étude. Il y a également un effet d'interaction significatif pour le niveau N3 entre les deux temps de l'étude (pré/posttest) et les deux groupes (CA/CI)  $F(1,62) = 4,47$ ;  $p = 0,039$ ;  $\eta^2 = 0,067$  (cf. Figure 14). Les analyses post-hoc de Bonferroni indiquent une augmentation significative du taux de bonnes réponses au niveau N3 uniquement pour le groupe CI, entre le pré et le posttest ( $p = 0,000$ ;  $d = -0,542$ ).

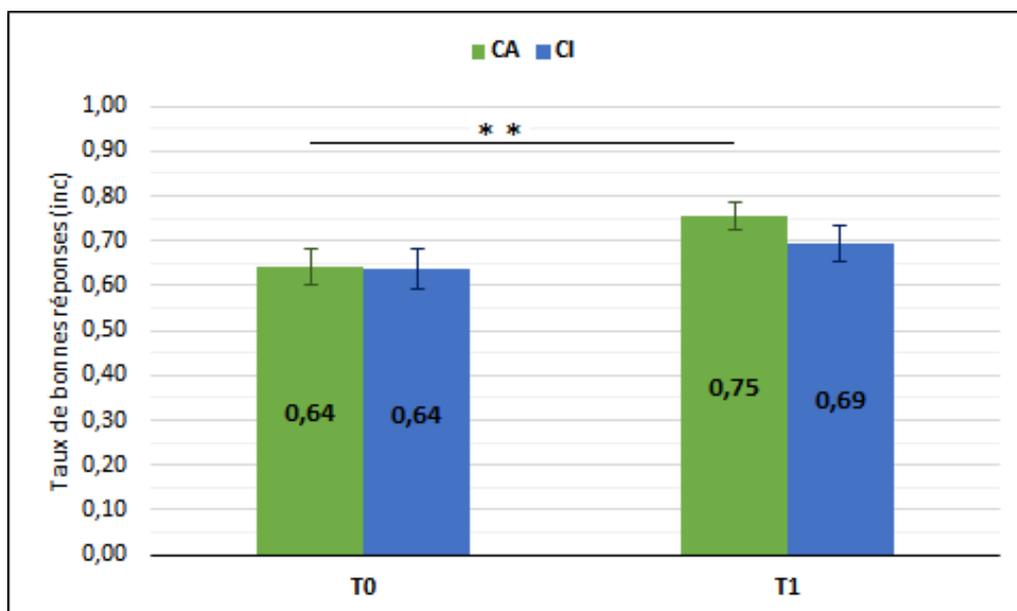


**Figure 14 :** Taux de bonnes réponses à 3 backs (nombre de taux réponses/nombre d'items) et SEM entre les deux groupes (CA/CI) et entre les deux temps de l'étude (pré/posttest)(\*\*\* $p < .001$ ).

Pour la tâche de résolution de problèmes arithmétiques, les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées sur le taux de bonnes réponses aux items incongruents, démontrent un effet simple entre le pré et le posttest significatif  $F(1,60) = 5,14$ ;  $p = 0,027$ ;  $\eta^2 = 0,051$  (cf. Figure 15). Les analyses post-hoc de Bonferroni montrent une augmentation significative du taux de

bonnes réponses aux items incongruents uniquement pour le groupe CA entre le pré et le posttest ( $p = 0,013$ ;  $d = -0,340$ ). De plus, les analyses réalisées avec le taux de bonnes réponses aux items congruents et neutres ne démontrent aucun effet significatif ( $F > 1$ ;  $ps > 0,110$ ). Ces taux sont élevés dès le prétest et restent stables au posttest pour les deux groupes d'entraînement.

Pour la tâche de grammaire, les résultats des analyses de variance ANOVA à mesures répétées sur le taux de bonnes réponses aux items incongruents, ne démontrent aucun effet significatif ( $F > 1$ ;  $ps > 0,111$ ). De plus, les analyses réalisées sur le taux de bonnes réponses aux items congruents et neutres ne démontrent aucun effet significatif ( $F > 1$ ;  $ps > 0,153$ ). En effet, d'un point de vue descriptif, les moyennes du taux de bonnes réponses aux items incongruents de la tâche restent très faibles entre les deux temps de l'étude pour les deux groupes (cf. Tableau 1, p. 100). Pour les items congruents et neutres, les moyennes des taux de bonnes réponses sont élevées et restent stables entre les deux temps de l'étude pour les deux groupes d'entraînement.



**Figure 15 :** Taux de bonnes réponses aux items incongruents à la tâche de problèmes arithmétiques et SEM entre les deux groupes (CA/CI° et les deux temps (pré/posttest) (\*\*  $p < .01$ ).

**Tableau 1 :** Moyennes, SEM et effectif pour les tâches de la batterie cognitive (inc = items incongruents; cong = items congruents)(\* p< .05; \*\* p< .01; \*\*\*p< .001)

Groupe	Tâches	prétest		posttest		N
		M	SEM	M	SEM	
CA	ANT	85,29	10,50	58,70	7,65	31
	Stroop	151,53	27,69	95,40	21,44	28
	<i>n-back</i> (N1)	0,76***	0,03	0,84***	0,03	31
	<i>n-back</i> (N2)	0,61***	0,04	0,76***	0,03	31
	<i>n-back</i> (N3)	0,65	0,03	0,70	0,03	28
	SST	289,48	12,74	284,01	11,70	32
	Arithmétique (inc)	0,64**	0,04	0,75**	0,03	30
	Arithmétique (cong)	0,91	0,02	0,88	0,02	26
	Arithmétique (neutre)	0,86	0,03	0,87	0,03	30
	Grammaire (inc)	0,08	0,02	0,13	0,04	27
	Grammaire (cong)	0,91	0,01	0,89	0,02	33
	Grammaire (neutre)	0,86	0,03	0,92	0,02	30
	Simon	39,25	4,99	37,38	6,21	27
	CI	ANT	72,97	8,52	49,12	6,30
Stroop		172,71*	33,76	69,96*	14,76	32
<i>n-back</i> (N1)		0,83***	0,03	0,89***	0,02	29
<i>n-back</i> (N2)		0,64***	0,03	0,77**	0,03	31
<i>n-back</i> (N3)		0,61***	0,03	0,74***	0,02	30
SST		270,38*	10,05	251,21*	9,60	31
Arithmétique (inc)		0,64	0,04	0,69	0,04	33
Arithmétique (cong)		0,85	0,02	0,90	0,02	31
Arithmétique (neutre)		0,95	0,02	0,94	0,02	27
Grammaire (inc)		0,07	0,02	0,08	0,02	25
Grammaire (cong)		0,91	0,02	0,92	0,01	29
Grammaire (neutre)		0,86	0,03	0,90	0,02	29
Simon		32,48	5,13	28,20	5,58	25

#### IV. Discussion

Le but de cette première étude était de mesurer les effets de transfert induits par un entraînement au contrôle inhibiteur ‘pur’ comparé aux résultats d’un groupe contrôle actif chez des enfants d’âge scolaire. Les résultats mettent en évidence un effet de transfert très proche. Les performances des enfants du groupe CI s’améliorent pour les deux tâches entraînées, c’est-à-dire la tâche de Stroop et la tâche de stop-signal, entre les deux temps de l’étude. Et de manière logique, ceci n’est pas le cas pour les performances des enfants du groupe CA.

Ensuite, les résultats ne démontrent pas d'effet de transfert proche (Karch et al., 2009; Thorell et al., 2009; Traverso et al., 2015; Souders et al., 2017). Ce résultat a été également retrouvé dans une étude évaluant les effets de l'entraînement au contrôle inhibiteur chez des enfants âgés entre 4 et 5 ans (Thorell et al., 2009). Ici, les enfants ne démontrent pas d'améliorations aux tâches d'inhibition non entraînées. Les auteurs l'expliquent par le fait que les capacités inhibitrices sont difficilement entraînables. En effet par exemple, dans une tâche de go/no-go ou de stop-signal les items no-go ou stop représentent une minorité des essais totaux. De ce fait l'inhibition n'est pas requise tout au long de la tâche, mais seulement pour quelques essais. Contrairement aux tests de mémoire de travail, où les capacités de mémoire de travail sont sollicitées à chaque essai de la tâche. Ce point explique donc le fait que l'on ne retrouve pas d'effet de transfert proche pour le groupe CI. Effectivement, il n'y a pas de progression suite à l'entraînement pour aucune des deux tâches utilisées, c'est-à-dire la tâche ANT et Simon. Pour la première, même si d'un point de vue descriptif le score des enfants diminue, il semblerait qu'elle soit trop facile pour eux. En d'autres termes, la tâche utilisée pour l'entraînement n'était pas adaptée à leurs performances. L'entraînement n'a donc pas ' challengé ' les compétences cognitives des enfants. Nous pouvons émettre cette hypothèse, puisque les taux de bonnes réponses aux items congruents et incongruents sont très élevés dès le prétest tout en restant stables au posttest, pour les deux groupes. Il est donc logique que l'entraînement n'ait pas induit de transfert pour cette tâche étant donné qu'elle était trop facile pour eux. Cependant, une explication alternative est possible concernant l'interprétation de ce résultat grâce selon l'hypothèse du phénomène de compensation (Kray & Lindenberger 2000; Cepeda et al., 2001; Bherer et al., 2008; Kray et al., 2008; Karch & Kray 2009; Brehmer et al., 2012; Zinke et al., 2014). Cette hypothèse considère que ce sont les individus avec de bonnes performances cognitives qui bénéficieraient le moins de l'entraînement. Effectivement, avoir de bonnes performances avant même le début de l'entraînement implique que ces individus ' fonctionnent ' déjà à un niveau optimal, ce qui laisse moins de place à l'amélioration. Pour la deuxième tâche, la tâche Simon, il semblerait que ce soit la fatigue des enfants qui ait empêché un transfert proche. Effectivement, cette tâche était présentée parmi les dernières d'un ensemble de tests cognitifs complet. Cet effet

de fatigue semble être confirmé par le fait que le taux de bonnes réponses aux items congruents et incongruents, ainsi que le score de conflit, restent stables entre les deux temps de l'étude et pour les deux groupes. Cette stabilité des scores entre le pré et le posttest sont éventuellement le reflet des effets de la fatigue des enfants. Malgré cela ces scores ne sont pas le reflet de mauvaises performances. Par conséquent, nous pouvons également émettre une deuxième hypothèse concernant l'interprétation de ce résultat. De fait, la sensibilité de la tâche Simon utilisée n'est peut-être pas suffisante pour évaluer les effets de transfert proche, suite à un entraînement au contrôle inhibiteur.

Dans la suite, les résultats mettent en évidence des effets de transfert lointain (Jaeggi et al., 2008; Karbach & Kray, 2009; Liu et al., 2015; Traverso et al., 2015; Homer et al., 2017). Par exemple, suite à un entraînement à la mémoire de travail, des chercheurs ont mis en évidence des effets de transfert lointain. Les adultes ayant suivi l'entraînement améliorent leurs compétences d'intelligence fluide (Jaeggi et al., 2008). De plus, une étude a démontré des effets de transfert lointain (et proche) chez des enfants, des adultes et des personnes âgées. Ici, les participants ont entraîné leurs capacités de flexibilité cognitive, et cet entraînement leur a permis d'améliorer leurs compétences inhibitrices (i.e. leurs performances à la tâche de Stroop). Et enfin, à l'aide d'un entraînement à une tâche de type go/no-go, des chercheurs ont constaté une amélioration dans les capacités de raisonnement chez des enfants âgés entre 4 et 5 ans (Liu et al., 2015). Dans notre étude et pour la tâche de mémoire de travail *n-back*, les performances au dernier niveau de difficulté (i.e. N3) augmentent entre le pré et le posttest uniquement pour le groupe CI. Cette amélioration relève un effet de l'entraînement au contrôle inhibiteur sur les capacités de mémoire de travail. Ce point est en accord avec la littérature qui souligne le fait que le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail se supportent réciproquement, et qu'il est rare que l'un de ces deux processus cognitifs soit utilisé sans l'autre (Diamond, 2013). Cette relation étroite explique donc cet effet de transfert démontré dans nos résultats. D'un autre côté, nous ne retrouvons pas d'effets de transfert lointain pour le groupe CI pour la tâche de résolution de problèmes arithmétiques et de grammaire (Lubin et al., 2013 & 2016; Lanoë et al., 2017). Cependant, on observe pour cette première tâche une augmentation du taux de bonnes réponses aux items

incongruents uniquement pour le groupe CA. Même si ce dernier n'est pas notre groupe d'intérêt, il est toutefois intéressant de souligner ce résultat. En effet, nous pouvons l'expliquer par le fait que pendant leur entraînement, les enfants du groupe CA sont amenés à lire de multiples énoncés afin de répondre aux questions, tout en évitant les pièges qui s'y trouvent parfois. Grâce à cela ils améliorent leurs capacités à ne pas se faire piéger par les informations trompeuses des énoncés présents dans les problèmes arithmétiques (i.e. "plus que" induisant une addition ou "moins que" induisant une soustraction). Cet effet de transfert lointain est confirmé par le fait qu'il n'y a pas de différence entre les taux de bonnes réponses pour les autres types d'items (i.e. congruents et neutres) entre les deux groupes et aux deux temps de l'étude. Les chercheurs, en utilisant cette même tâche, avaient mis en évidence l'implication du contrôle inhibiteur dans la réussite de la tâche (Lubin et al., 2013 & 2016). Mais avec ce résultat il semblerait que, en plus de bonnes capacités inhibitrices, être confronté à la lecture de nombreux énoncés pourrait également aider les enfants à faire face aux pièges contenus dans les problèmes arithmétiques. Ce point soulève le fait qu'au sein du contrôle inhibiteur, il existe différents types d'inhibition. Par exemple, dans une étude comparant des enfants bilingues à des monolingues, les chercheurs ont mis en évidence que les enfants bilingues présentaient de meilleures performances à la tâche Simon, impliquant l'inhibition attentionnelle, ce qui n'était pas le cas pour la tâche de Stroop, impliquant l'inhibition de la réponse (Martin-Rhee & Bialystok, 2008). Par conséquent, ces résultats confirment qu'il existe différents processus inhibiteurs, et nous donne une possible interprétation à notre résultat. En effet, il semblerait que les processus d'inhibition des stratégies, évalués dans l'étude de Lubin et coll. (2013 & 2016), ne soient pas les mêmes que les processus d'inhibition des distracteurs, sollicités pendant à l'entraînement du groupe CA. Concernant la tâche de grammaire, on n'observe aucun effet de transfert lointain pour aucun des deux groupes. Effectivement, pour les items congruents et neutres les taux de bonnes réponses sont élevés dès le prétest tout en restant stables au posttest. Donc, leurs performances étant déjà optimales, ceci implique une très faible marge de progression, alors que pour les items incongruents, le taux de bonnes réponses est vraiment très faible. Ici malheureusement, nous ne pouvons pas savoir si les enfants détectent le conflit des items incongruents et/ou s'ils ont conscience qu'ils se trompent. Par conséquent, il

faudrait à l'avenir faire remplir aux participants une échelle de Likert nous permettant d'évaluer la confiance qu'ils ont en leurs réponses (Lanoë et al., 2017).

Pour conclure, l'entraînement au contrôle inhibiteur produit de légers effets de transfert très proche et lointain chez des enfants d'âge scolaire. L'une des explications est, qu'au cours d'une tâche d'inhibition, les capacités inhibitrices ne sont pas sollicitées tout au long de la tâche mais seulement dans certains essais (Thorell et al., 2009; Karbach & Unger, 2014). Par exemple, dans la tâche de stop-signal, les items stop ne représentent que 25% des essais totaux. On peut donc conclure que la tâche de stop-signal n'est peut-être pas idéale pour entraîner le contrôle inhibiteur chez l'enfant. Cependant, des chercheurs ont démontré une amélioration comportementale accompagnée d'un changement d'activation cérébrale suite à un entraînement à la tâche de stop-signal chez de jeunes adultes (Berkman et al., 2014). Par conséquent, cette tâche peut tout à fait être utilisée au cours d'un entraînement cognitif, mais elle n'est peut-être pas adaptée aux enfants. Ainsi, il semble nécessaire de réaliser des études permettant de comparer plusieurs programmes d'entraînement comprenant différentes tâches d'inhibition. Cette comparaison permettrait, en effet, d'identifier les tâches efficaces pour entraîner le contrôle inhibiteur. Une autre limite de cette étude est que, dans les analyses statistiques, les performances pendant les 5 semaines d'entraînement, ainsi que la motivation tout au long des séances, n'ont pas été prises en compte (Diamong & Ling, 2016). Ces facteurs pourraient expliquer ces résultats. En effet, si par exemple les performances des enfants du groupe CI ne progressent pas pendant l'entraînement ou s'ils n'étaient pas motivés, cela peut influencer négativement les effets induits par l'entraînement. C'est donc l'objectif de cette prochaine étude : inclure les données des entraînements dans les analyses.

## **Étude n°2 : Étude des effets de la progression et de la motivation sur les effets de transfert induits par un entraînement intensif au contrôle inhibiteur chez des enfants d'âge scolaire**

### **I. Introduction**

Les études sur les effets de l'entraînement des fonctions exécutives ont connu un essor ces dernières années (Jaeggi et al., 2008; Karbach & Kray, 2009; Thorell et al., 2009; Berkman et al., 2014; Karbach & Unger, 2014; Au et al., 2015; Liu et al., 2015; Traverso et al., 2015; Wilkinson et al., 2015; Homer et al., 2017; Souders et al., 2017). Elles ont un aspect très prometteur d'un point de vue pédagogique. En effet, elles jouent un rôle primordial dans de multiples domaines tels que le fonctionnement cognitif, le contrôle comportemental et les interactions sociales. Elles ont également un rôle de prédicteur dans la réussite scolaire et professionnelle (Dennis, 1989; Blair & Razza, 2007; Carlson & Moses, 2013; Kim et al., 2013) mais également dans la santé mentale et physique, ou encore la richesse et la qualité de vie (Moffitt et al., 2011; Reinert et al., 2013; Bull & Lee, 2014; Cragg & Gilmore, 2014; Liang et al., 2014). Malgré le nombre croissant d'études, les résultats restent très diversifiés, notamment en terme d'effets de transfert proche et lointain (Jaeggi et al., 2008; Karbach & Kray, 2009; Thorell et al., 2009; Berkman et al., 2014; Karbach & Unger, 2014; Au et al., 2015; Liu et al., 2015; Traverso et al., 2015; Wilkinson et al., 2015; Homer et al., 2017; Souders et al., 2017). Il est possible d'expliquer cette diversité des résultats notamment par la grande variété des matériels et méthodes utilisés. Par ailleurs, les analyses des données consistent, très souvent, à uniquement comparer les changements de performances entre le pré et le posttest, alors que les performances et la motivation tout au long de l'entraînement sont mises de côté. Pourtant, un lien a été démontré entre la motivation et le contrôle exécutif (Pessoa et al., 2009). Dans cette étude, les chercheurs ont montré que les émotions et la motivation peuvent améliorer ou altérer les performances comportementales en fonction de la manière dont elles interagissent avec les fonctions exécutives. Ce lien semble logique, dans le sens où les émotions et la motivation jouent un rôle crucial dans les

comportements humains. Par conséquent, elles influencent directement les fonctions exécutives. Il est alors primordial de prendre en compte ces aspects dans l'analyse des études de l'effet de l'entraînement. Le but de cette étude est de donner une réponse directe à l'étude n°1, et donc nous prenons à nouveau exactement le même jeu de données. Pour rappel, l'échantillon comporte des enfants âgés de 9 à 10 ans répartis en deux groupes distincts, et ayant suivi un entraînement de 5 semaines : un groupe contrôle actif répondant à des questions de culture générale, et un groupe suivant un entraînement au contrôle inhibiteur. Pour analyser les performances des enfants, nous avons utilisé le meilleur niveau atteint au cours d'une séance pour les 3 premières et 3 dernières séances (Thorell et al., 2009). Concernant le niveau de motivation, c'est grâce à un journal de bord rempli par les enfants tout au long de l'entraînement que nous avons pu mesurer le niveau de motivation des enfants.

## II. Matériels et méthodes

**Participants.** Les enfants ont été recrutés dans les classes des écoles primaires élémentaires aux alentours de la ville de Caen (Calvados). Ils avaient tous entre 9 et 10 ans (moyenne : 9,79 ans  $\pm$  0,56). L'échantillon comporte au total 66 enfants dont 33 enfants dans le groupe contrôle actif, appelé groupe CA (19 filles, moyenne : 9,93  $\pm$  0,58) et 33 enfants dans le groupe suivant l'entraînement au contrôle inhibiteur, appelé groupe CI (19 filles, moyenne : 9,65  $\pm$  0,50). Les enfants ont été sélectionnés en fonction de la médiane du nombre de séances enregistrées sur la tablette tactile, c'est-à-dire tous les enfants avec moins de 19 séances pour les deux jeux du groupe CA et pour la tâche de Stroop, et avec moins de 17 séances à la tâche de stop-signal (du fait de bugs récurrents pour cette tâche en particulier) ont été retirés des analyses statistiques.

**Entraînements.** Les enfants ont tous suivi un entraînement de 5 semaines et de 15 minutes par jour, 5 jours par semaine sur tablette tactile et à domicile. Le groupe CA a répondu à des questions de culture générale réparties en deux jeux distincts, dont la difficulté est adaptative aux performances des enfants avec 8 niveaux de difficulté. Le groupe CI a suivi un entraînement à la tâche de Stroop classique et à la tâche de stop-signal. Ici aussi, la difficulté était adaptée aux performances des enfants avec 8 niveaux de difficulté.

**Journaux de bord.** En plus de la tablette, un journal de bord a été fourni aux enfants afin de garder une trace des différentes séances et des éventuels bugs de tablette. Ce journal de bord contenait également une échelle de Likert (de 1 à 5) permettant aux enfants d'indiquer leur motivation pendant chaque séance. Ils devaient donc spécifier s'ils n'étaient 'pas du tout' motivés en entourant le chiffre 1, ou 'tout à fait' motivés en entourant le chiffre 5 représenté par un smiley vert.

**Batterie pré et posttest.** Les batteries de tests cognitifs ont été réalisées soit dans les locaux de l'école primaire, soit au domicile de l'enfant. L'intégralité des tâches a été programmée à l'aide du logiciel E-Prime® 2.0, et elles sont donc toutes informatisées. Les enfants ont tous passé la batterie de tests seul avec un expérimentateur, dans une salle au calme. L'expérimentateur expliquait oralement les règles des jeux, et les boutons réponses tout en s'assurant que l'enfant soit parfaitement concentré et qu'il ait compris les règles. Les tâches sélectionnées par intérêt pour les analyses statistiques font en réalité partie d'une batterie cognitive complète. Une partie nous a permis de mesurer les effets de transfert proche, grâce à la tâche de Flanker (ANT) et à la tâche Simon. Une autre partie nous a permis d'évaluer les effets de transfert lointain, grâce à la tâche de *n-back* (allant jusqu'à 3 *backs*) et à deux tâches évaluant les capacités scolaires arithmétiques et de grammaire (cf. Matériels et méthodes de l'étude n°1).

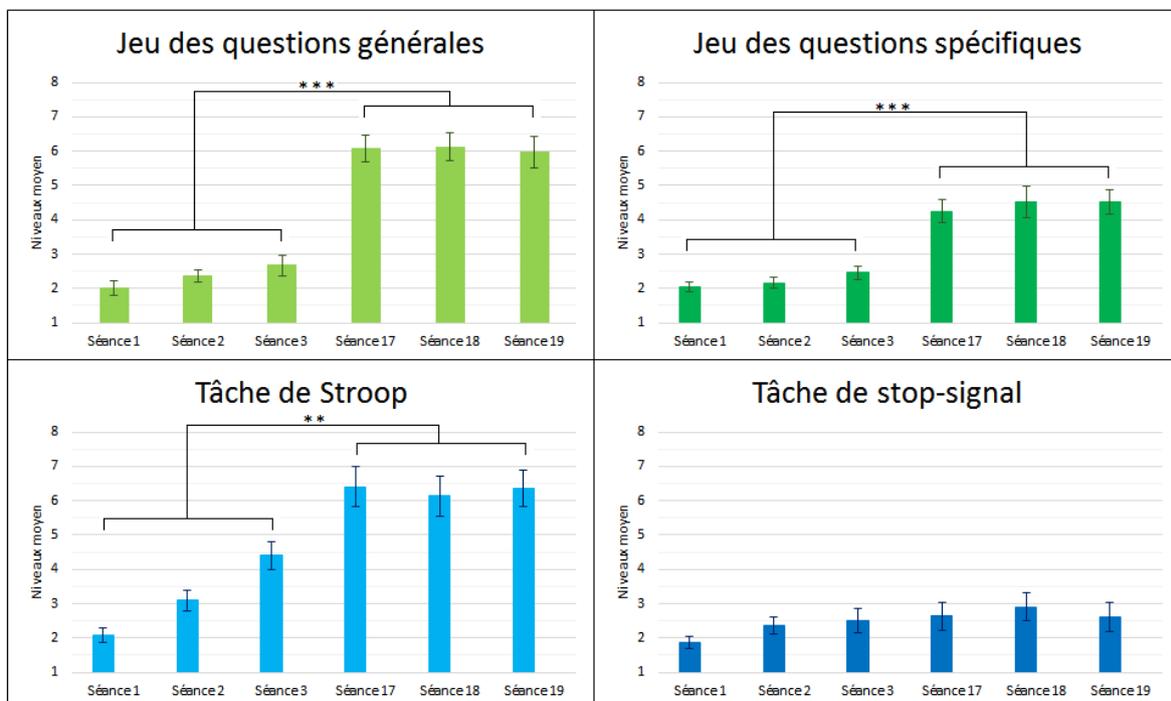
**Analyses.** Les analyses statistiques ont toutes été réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA version 10 ([www.statsoft.fr](http://www.statsoft.fr)), et à l'aide du logiciel JASP version 0.9 ([jasp-stats.org/](http://jasp-stats.org/)). La moyenne du meilleur niveau atteint pendant les 3 premières et les 3 dernières séances a été utilisée comme indice, ainsi que la motivation moyenne.

### III. Résultats

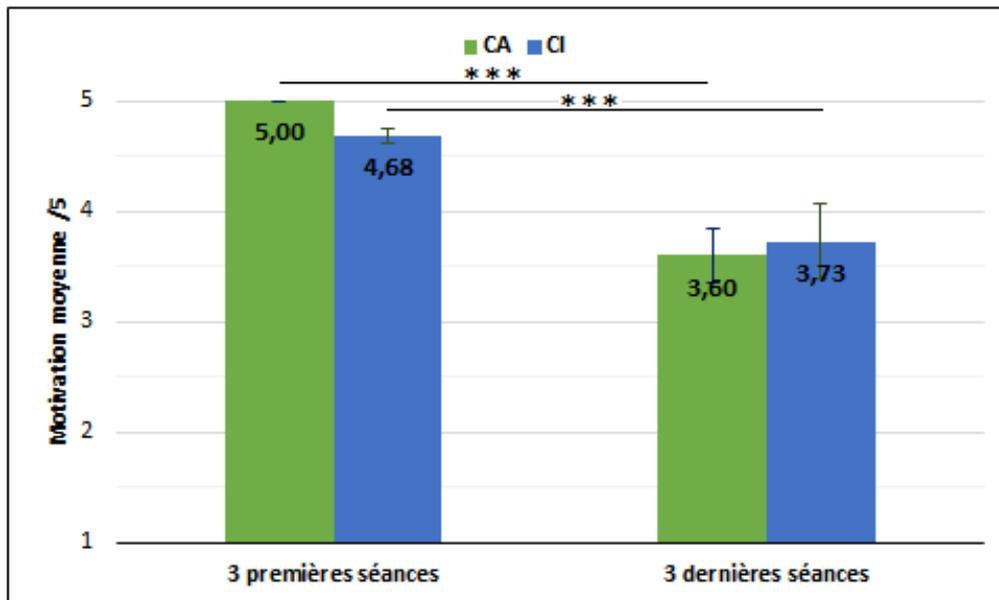
**Taux de progression.** Les analyses statistiques de t de Student pour échantillon appariés sur le meilleur niveau atteint pendant les 3 premières et les 3 dernières séances pour les tâches entraînées du groupe CA et celles du groupe CI. Les résultats démontrent une augmentation significative des meilleurs niveaux atteints entre les 3 premières et 3 dernières séances (cf. Figure

17) pour les enfants du groupe CA pour les deux jeux de questions de culture générale (Jeu des questions générales :  $t(24) = -12,86$ ;  $p = 0,000$  ; Jeu des questions spécifiques :  $t(24) = -6,76$ ;  $p = 0,000$ ). Pour les enfants du groupe CI, on retrouve également cette amélioration mais uniquement pour la tâche de Stroop (Stroop :  $t(22) = -7,26$ ;  $p = 0,010$  ; stop-signal :  $p = 0,108$ ).

**Niveau de motivation.** Les analyses de variance ANOVA à mesures répétées entre le niveau de motivation (3 premières/dernières séances) et les deux groupes d'entraînements (CA/CI), montrent un effet simple significatif entre le pré et le posttest  $F(1,44) = 34,70$ ;  $p = 0,000$ ;  $\eta^2 = 0,434$  (cf. Figure 18). Les analyses post-hoc de Bonferroni démontrent une baisse significative de la motivation moyenne pour les deux groupes et entre le pré et le posttest (CA :  $p = 0,000$  ;  $d = 0,874$  ; CI :  $p = 0,001$ ;  $d = 0,065$ ). Ensuite, d'autres analyses ont été réalisées entre la motivation moyenne tout au long de l'entraînement et entre les deux groupes. Les analyses de variance ANOVA à un facteur ne montrent pas de différence entre la motivation moyenne tout au long de l'entraînement et les groupes CA/CI ( $p = 0,509$ ).



**Figure 16 :** Meilleur niveau moyen atteint et SEM entre les 3 premières séances (1-2-3) et les 3 dernières (17-18,19) pour les deux jeux du groupe CA et pour les deux jeux du groupe CI (\*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ ).



**Figure 17 :** Motivation moyenne (max 5) et SEM entre les 3 premières et les 3 dernières séances entre les deux groupes (CA/CI)(\*\*\* $p < .001$ ).

**Relations réciproques entre les scores cognitifs et la progression pendant l'entraînement.** Pour ces analyses, nous avons utilisé le modèle "Cross-Lagged Panel" (ou CLPM) (Campbell, 1963; Kenny, 1973) (cf. Figure 19 A). Ce modèle est largement utilisé pour évaluer la stabilité et les relations entre plusieurs variables à travers le temps. Grâce à ce modèle, nous allons donc pouvoir mesurer la relation entre les scores cognitifs obtenus pendant la batterie de tests aux deux temps de l'étude et la moyenne du meilleur niveau atteint aux 3 premières et 3 dernières séances pendant l'entraînement sur la tablette dans le groupe CI. Pour cela, il faut comparer la relation entre la variable X au Temps 1 (i.e. ici le score cognitif au prétest) et la variable Y au Temps 2 (i.e. ici la moyenne du meilleur niveau atteint aux 3 dernière séances) avec la relation de la variable Y au Temps 1 (i.e. la moyenne du meilleur niveau atteint aux 3 premières séances) et la variable X au Temps 2 (i.e. le score cognitif au posttest) (cf. Figure 19 B 1). Nous avons retiré la tâche de grammaire et Simon de nos analyses du fait que dans l'étude n°1, les résultats pour ces deux tâches ne démontrent aucun effet significatif. Nous avons donc sélectionné les deux tâches entraînées (Stroop et stop-signal), la tâche ANT et *n-back* (respectivement transfert proche et lointain). Ensuite, nous avons utilisé la moyenne des meilleurs niveaux atteints au début et à la fin de l'entraînement (3 premières et 3 dernières séances) à la tâche de Stroop entraînée du groupe

CI. En effet pour cette dernière, les résultats démontrent une progression significative entre le début et la fin de l'entraînement, contrairement à la tâche de stop-signal. De plus, ces mêmes analyses ont été réalisées pour le groupe CA mais ne démontrent pas d'effet significatif.

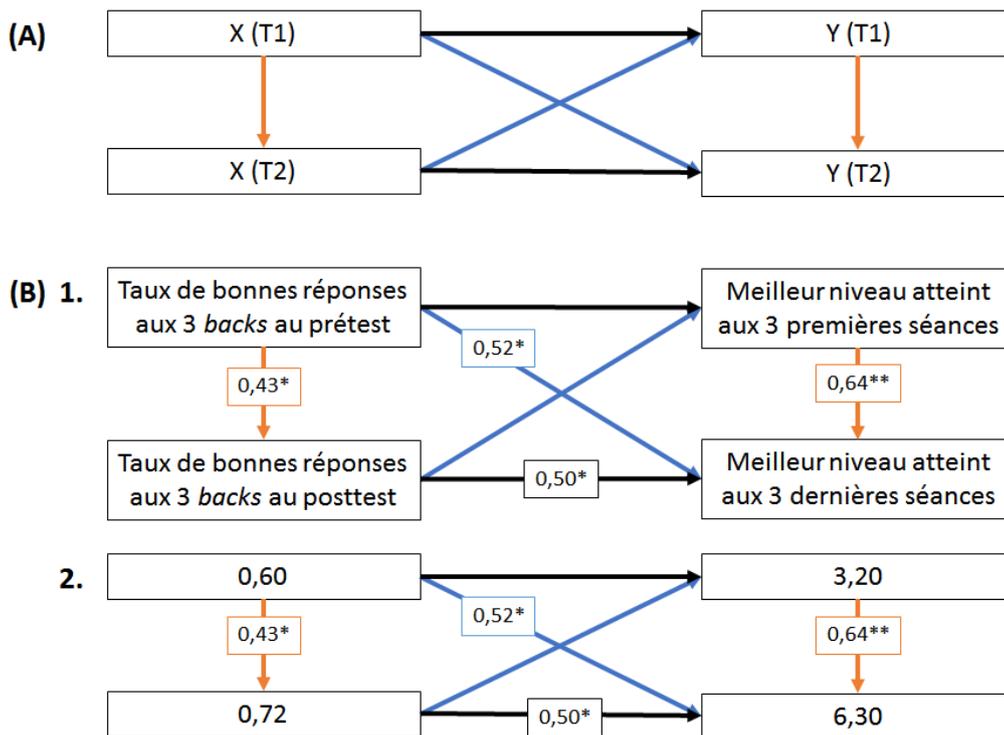
Les résultats des corrélations de Pearson montrent uniquement deux relations causales significatives (cf. Figure 19 B 2) : (1) entre le taux de bonnes réponses aux 3 *backs* au prétest ( $r = 0,52$ ;  $p = 0,011$ ) et la moyenne du meilleur niveau atteint aux 3 dernières séances à la tâche de Stroop entraînée, (2) et entre le taux de bonnes réponses aux 3 *backs* au posttest ( $r = 0,50$ ;  $p = 0,016$ ) et la moyenne du meilleur niveau atteint aux 3 dernières séances à la tâche de Stroop entraînée (cf. Tableau 2 A). La deuxième partie des corrélations ne démontrent pas d'effet significatif (3) entre le taux de bonnes réponses aux 3 *backs* au prétest et la moyenne du meilleur niveau atteint aux 3 premières séances à la tâche de Stroop, et (4) entre le taux de bonnes réponses au posttest et la moyenne et la moyenne du meilleur niveau atteint aux 3 premières séances (cf. Tableau 2). Ensuite, la dernière partie des corrélations démontrent une relation significative entre (5) les taux de bonnes réponses entre le pré et le posttest ( $r = 0,43$ ;  $p = 0,044$ ), et (6) entre les moyennes du meilleur niveau atteint entre les 3 premières et les 3 dernières séances ( $r = 0,64$ ;  $p = 0,001$ ). Cependant, les résultats pour les autres tâches ne démontrent aucun effet significatif (cf. Tableau 2).

**Tableau 2** : Moyennes, écartypes, corrélations de Pearson et valeurs de  $p$ .

(A)				3 premières séances		3 dernières séances	
		M	SD	$r$	$p$	$r$	$p$
prétest	Stroop	164,74	216,90	-0,039	0,864	-0,150	0,504
	SST	285,18	56,32	0,206	0,358	0,111	0,623
	ANT	86,58	53,57	-0,201	0,370	-0,044	0,847
	<i>n-back</i> (N3)	0,60	0,20	0,268	0,228	<b>0,528</b>	<b>0,011**</b>
posttest	Stroop	69,60	87,94	-0,022	0,921	0,187	0,406
	SST	257,65	56,26	-0,140	0,534	-0,226	0,311
	ANT	55,26	37,66	0,120	0,594	0,129	0,566
	<i>n-back</i> (N3)	0,72	0,15	0,174	0,438	<b>0,508</b>	<b>0,016**</b>

(B)		$r$	$p$
Modèles			
Stroop prétest → Stroop posttest		0,284	0,200
SST prétest → SST posttest		-0,057	0,800
ANT prétest → ANT posttest		0,210	0,347
<i>n-back</i> (N3) prétest → <i>n-back</i> (N3) posttest		<b>0,43</b>	<b>0,044*</b>
3 premières séances → 3 dernières		<b>0,64</b>	<b>0,001**</b>



**Figure 18 :** (A) Paradigme de corrélations du modèle Cross-Lagged Panel (CLP)(X et Y = variables; T1 et T2 = deux temps de l'étude. (B) 1. Paradigme de corrélations du modèle CLP avec les variables correspondantes, et les valeurs de r de Pearson ; 2. Modèle CLP et les scores correspondants aux variables (\* p< .05; \*\* p< .01).

#### IV. Discussion

L'objectif de cette étude était de mieux comprendre les résultats présentés lors de l'étude n°1 en analysant les données de performance ainsi que l'évolution de la motivation des enfants tout au long de l'entraînement. Les résultats démontrent une progression significative entre le début et la fin de l'entraînement pour toutes les tâches, exceptée pour celle de stop-signal. Ceci prouve que cette dernière ne semble pas adaptée aux enfants. Par exemple en règle générale, face à l'aspect imprévisible des items stop les participants de tout âge ont tendance à retarder leurs réponses aux items go afin 'd'attendre' l'apparition éventuelle des items stop. Il est facile de vérifier si c'est le cas : en regardant si le temps de réponse moyen aux items go augmente, parce que cela signifierait que les participants attendent l'apparition du bip sonore. Par conséquent, ce paramètre a été vérifié parmi les données de la batterie aux deux temps de l'étude, et les enfants ne ralentissent pas leurs réponses aux items go. Cependant, au vu de la quantité des données

cette vérification n'a pas pu être faite pour la partie entraînement. Étant donné que l'entraînement se faisait entièrement à domicile, il était difficile d'empêcher les enfants de ralentir leurs temps de réponse aux items go. Par conséquent, cette limite devra faire l'objet d'analyses dans la suite de la recherche. De plus, selon les retours des enfants du groupe CI, une très grande majorité d'entre eux n'aimait pas du tout la tâche de stop-signal ce qui a sans nul doute joué sur leurs performances et leur motivation.

Ensuite, des analyses ont été réalisées afin de comparer le niveau de motivation moyen tout au long de l'entraînement entre les deux groupes. Elles n'ont pas montré de différence, ce qui révèle que la motivation moyenne tout au long de l'entraînement était identique entre les deux groupes. Cependant, les résultats supplémentaires indiquent que le niveau moyen de motivation entre le début et la fin de l'entraînement diminue significativement pour les deux groupes. Encore une fois, ceci nous a été confirmé grâce aux retours des enfants suite à l'entraînement. En effet, la plupart d'entre eux ont trouvé les jeux extrêmement répétitifs voire rébarbatifs, ce qui a indubitablement influencé leurs performances (Green & Bavelier, 2008). Les jeux ont été programmés par notre équipe et ne ressemblent en rien aux jeux vidéo disponibles dans le commerce auxquels les enfants sont largement plus habitués. Ce point est assurément une limite de notre étude et sera à améliorer à l'avenir. Pour pallier cette baisse de motivation, il faudrait amplement s'inspirer des points forts des jeux vidéo, tels que l'aspect visuel attrayant ou les *feedbacks*. Ceci a même donné naissance à un nouveau champ d'étude pluridisciplinaire très prometteur : le *serious gaming*. Ce dernier allie les connaissances des neurosciences sur les apprentissages scolaires ou le vieillissement cognitif avec l'expérience des designers de jeux vidéo.

Ensuite, les analyses selon le modèle CLP confirment les résultats de l'étude n°1. Il y a une corrélation positive entre le niveau atteint au début et à la fin de l'entraînement, uniquement pour le groupe CI. Ces résultats démontrent que plus les performances des enfants du groupe CI à la tâche de Stroop entraînée au début de l'entraînement sont élevées, plus elles le seront également à la fin de l'entraînement. De plus, les résultats mettent en évidence une corrélation positive uniquement pour la tâche de mémoire de travail (aux 3 *backs*), entre les performances à cette tâche au pré et au posttest, à nouveau uniquement dans le groupe CI. En outre, il y a une relation

réciroque entre les performances à la tâche de mémoire de travail *n-back* (N3) et le niveau atteint à la fin de l'entraînement, toujours uniquement pour le groupe CI. Ces résultats confirment l'effet de transfert lointain sur les capacités de mémoire de travail suite à un entraînement au contrôle inhibiteur chez des enfants d'âge scolaire. Néanmoins, les analyses ne montrent aucune autre corrélation entre les scores cognitifs aux autres tâches cognitives (i.e. ANT, Stroop et SST) et la progression pendant l'entraînement. À nouveau, cette absence de relation réciroque concorde avec la fragilité des effets de transfert proche. Une des limites à prendre en compte dans l'interprétation de ces résultats est que nous avons choisi d'utiliser les performances obtenues à la tâche de Stroop entraînée, du fait que la progression pour la tâche de stop-signal était nulle. Effectivement, les performances à la tâche de Stroop pendant l'entraînement augmentaient très vite pour les enfants du groupe CI. Ils arrivent sans difficulté et rapidement au niveau maximum. Par conséquent, ceci à favoriser les effets de transfert. Cependant, à cause de l'aspect rapide de cette progression, il est possible que cette tâche ait été trop facile pour eux, ce qui impliquerait que l'entraînement n'a pas pleinement 'challenge' les capacités inhibitrices des enfants. Cet aspect de challenge est indispensable pour améliorer les compétences cognitives, de la même manière qu'un programme sportif où l'intensité et la répétition d'un mouvement sont augmentées à chaque séance afin de progresser (Diamond & Lee, 2011; Diamond & Ling, 2016). Ces points soulignent également l'importance d'adapter la difficulté de la tâche aux performances des participants suivant l'entraînement aussi bien dans la construction des tâches entraînées que sur toute la période de l'entraînement. Par conséquent, l'une des tâches était trop facile et l'autre trop difficile pour les enfants, ce qui explique les effets de transfert proche limités. Les processus d'inhibition sont donc difficilement entraînales pour différentes raisons. Comme déjà mentionné précédemment, la première raison correspond au fait que pendant une tâche d'inhibition les stimuli nécessitant les capacités inhibitrices représentent une minorité des essais. La deuxième souligne le fait qu'il est plus difficile d'adapter le niveau de difficulté de la tâche d'inhibition en fonction des performances de enfants (Klingberg et al., 2002 & 2005; Thorell et al., 2009). Contrairement à une tâche de mémoire de travail, où le nombre d'items à maintenir en mémoire augmente au fur et à mesure, alors que cet aspect est beaucoup plus confus pour une tâche

d'inhibition. En conséquence, d'autres recherches sont nécessaires afin ces contraintes n'en soient plus.

Cette étude prouve donc que les performances ainsi que la motivation sont à prendre en compte dans les analyses des études des effets de l'entraînement des fonctions exécutives. En effet, dans le cas de notre jeu de données, ce type d'analyse nous a permis d'approfondir les résultats dévoilés lors de l'étude n°1. Une des limites ici, est que nous n'avons pas réalisé d'analyse entre la motivation et la progression des scores cognitifs entre les deux temps de l'étude. Le fait que la motivation baisse entre les deux temps de l'étude, ne nous a pas encouragés dans cette direction. Cependant, il serait intéressant à l'avenir de réaliser ces analyses. Un autre point intéressant a été soulevé, c'est notamment le fait de prendre en compte le retour direct des enfants ayant participé à l'étude afin d'interpréter les résultats. Maintenant, nous pouvons nous poser la question suivante : les changements comportementaux induits par l'entraînement au contrôle inhibiteur sont-ils accompagnés de changements au niveau cérébral anatomique ?

## **Étude n°3 : Modifications structurales complexes du cortex préfrontal induites par entraînement au contrôle inhibiteur de l'enfance à l'adolescence**

*Cette étude est actuellement en révision dans la revue *Developmental Science* : Delalande, L., Moyon, M., Tissier, C., Dorrière, V., Mevel, K., Charron, S., Salvia, E., Poirel, N., Vidal, J., Lion, S., Oppenheim, C., Houdé, O., Cachia, A., et Borst, G. *Complex structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence*. (cf. annexe 6).*

### **I. Introduction**

Le contrôle inhibiteur (CI ; i.e. la capacité à résister aux automatismes, aux tentations, aux distractions ou aux interférences et à s'adapter à des situations conflictuelles; voir Diamond, 2013) est un processus essentiel du développement cognitif et socio-émotionnel (pour une revue, voir Borst, Aite, & Houdé, 2015). Un nombre croissant d'études a démontré que le développement de compétences complexes, telles que les compétences arithmétiques (par exemple, Espy et al., 2004; Gilmore et al., 2013), le raisonnement (pour un aperçu, voir Houdé & Borst, 2015), la théorie de l'esprit (par exemple, Benson, Sabbagh, Carlson et Zelazo, 2013; Marcovitch et al., 2015), la prise de décision (pour revue, voir Cassotti, Aite, Osmont, Houdé et Borst, 2014) et la créativité (pour revue, voir Cassotti, Agogue, Camarda, Houdé et Borst, 2016), s'appuie sur l'efficacité accrue du contrôle inhibiteur. De plus, les capacités du CI dans l'enfance prédisent le succès scolaire et professionnel ainsi que l'adaptation sociale (Diamond, 2013; Kim, Nordling, Yoon, Boldt et Kochanska, 2013; Moffitt et al., 2011). Compte tenu du rôle critique joué par les fonctions exécutives et en particulier par le CI dans le développement cognitif, socio-émotionnel et la réussite scolaire, un certain nombre d'entraînements ont été conçus pour améliorer le fonctionnement exécutif tout au long de la vie (voir les analyses, Jolles & Crone, 2012; Karbach & Unger, 2014; Spierer, Chavan et Manuel, 2013). L'un des objectifs de ces études est de déterminer dans quelle mesure l'entraînement du contrôle exécutif et l'entraînement au CI en particulier

permettent le transfert à des tâches non entraînées relevant du même domaine ou de la même fonction exécutive (c'est-à-dire transfert proche) ou encore d'autres domaines ou fonctions. Chez les enfants d'âge préscolaire, l'entraînement au CI à l'aide d'un jeu (e.g., "Jacques a dit") a amélioré les performances de la tâche Go/NoGo (inhibition de la réponse) mais pas celles de la tâche de Stroop (contrôle des interférences), suggérant ainsi un transfert proche limité (Zhao, Chen, Fu et Maes, 2015; mais voir Dowsett et Livesey, 2000 pour un effet de transfert proche chez les enfants d'âge préscolaire de familles à faible statut socio-économique). En outre, l'entraînement informatisé du CI chez les enfants d'âge préscolaire a amélioré les capacités de raisonnement abstrait (transfert lointain) (Liu et al., 2015; voir aussi Rueda et al., 2005 pour un transfert similaire aux capacités de raisonnement abstrait après un entraînement exécutif de l'attention). Chez l'adulte, l'entraînement au CI avec par exemple, la tâche Simon et la tâche émotionnelle Go/NoGo a démontré un transfert des compétences au contrôle des interférences dans une tâche de Flanker non entraînées (Millner, Jaroszewski, Chamarthi et Pizzagalli, 2012). Cependant, d'autres études n'ont montré aucun effet de transfert proche ou lointain de l'entraînement au CI chez les enfants (Enge et al., 2014; Talanow & Ettinger, 2018; Thorell, Lindqvist, Bergman Nutley, Bohlin et Klingberg, 2009; Zhao, Chen et Maes, 2018).

Des études sur l'entraînement au CI ont également étudié les mécanismes neuroplastiques des régions corticales et sous-corticales centrales du réseau du CI à la base des effets de l'entraînement comportemental chez les enfants et les adultes (Jolles & Crone, 2012; Owen et al., 2010), c'est-à-dire le cortex préfrontal (CPF), y compris le gyrus frontal inférieur (GFI) et le cortex cingulaire antérieur (CCA), la région motrice présupplémentaire (pré-SMA), le striatum, les ganglions de la base et le cortex pariétal (Aron, Robbins, & Poldrack, 2014; Houdé, Rossi, Lubin et Joliot, 2010; Satterthwaite et al., 2013). Chez l'adulte, un entraînement à l'inhibition de la réponse de courte durée (par exemple 1 heure) ou de moyenne durée (par exemple, 5 à 10 h sur plusieurs semaines), à l'aide de la tâche Go/NoGo ou de la tâche Stop-Signal (SST), a induit de la neuroplasticité fonctionnelle soit dans les régions centrales des réseaux du CI (Berkman, Kahn et Merchant, 2014; Manuel, Bernasconi, & Spierer, 2013; voir pour revue, Spierer et al., 2013) soit dans le cortex temporo-pariétal, suggérant le développement des compétences inhibitrices grâce

à l'entraînement au CI dans certaines tâches d'inhibition (Manuel, Grivel, Bernasconi, Murray et Spierer, 2010). Les changements neuroplastiques ne se limitent pas à l'augmentation (ou à la diminution) de l'activité neuronale suite à un entraînement du CI, mais ils s'étendent également aux changements de connectivité fonctionnelle entre le réseau du CI et d'autres réseaux (Hu, Wang, Zhang, Hu, & Chen, 2017). Par exemple, un entraînement de cinq semaines portant sur le contrôle des interférences à l'aide de la tâche de Stroop a permis d'accroître la connectivité au sein du réseau cingulo-operculaire mais également au niveau du cervelet et du réseau visuel primaire, cette connectivité accrue étant associée à des gains comportementaux suite à un entraînement (Hu et al., 2017). Enfin, une étude combinait l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et structurale (IRM) afin d'étudier les changements neuroplastiques fonctionnels et structurels après un entraînement au CI à l'aide de la tâche SST (Chavan, Mouthon, Draganski, van der Zwaag et Spierer, 2015). Dans cette étude, les améliorations des compétences inhibitrices étaient associées à une diminution de l'activité neuronale dans le pars operculaire et triangulaire droits, et dans la partie orbitaire gauche du gyrus frontal inférieur gauche. Ces améliorations étaient également associées à une augmentation du volume de matière grise dans le pars orbitaire droit et à des modulations de la microstructure de la substance blanche dans la partie droite triangulaire. Chez les enfants de 4 à 6 ans, un entraînement de l'attention de 5 jours a conduit à une topographie des marqueurs EEG plus semblable aux adultes dans la tâche de Flanker avec une source d'activation au niveau du CCA au posttest (Rueda et al., 2005, voir également Rueda, Checa et Combata, 2012 pour les modifications de l'EEG induites par un entraînement sur 2 mois). Enfin, une étude sur les enfants âgés de 4 à 5 ans a mis en évidence une augmentation de la composante N2 dans la tâche Go/NoGo chez les filles mais pas chez les garçons après un entraînement informatisé au CI de 12 sessions avec une version adaptée aux enfants de la tâche Go/NoGo (Liu et al., 2015).

De manière surprenante, aucune étude n'a étudié la neuroplasticité structurale induite par l'entraînement au CI de l'enfance à la fin de l'adolescence, une période de développement caractérisée par une amélioration comportementale du CI (Diamond, 2013) et une maturation structurale et fonctionnelle prolongée de plusieurs régions du CPF impliquées dans le CI (pour une

revue, voir Crone & Steinbeis, 2017). Le but de la présente étude était donc d'étudier les changements comportementaux et structurels induits par un entraînement informatisé du CI chez les enfants d'âge scolaire (âgés de 9 à 10 ans) et les adolescents (âgés de 15 à 17 ans) par rapport à ceux ayant suivi un contrôle actif informatisé (pour contrôler les effets test-retest et se conformer aux recommandations de plusieurs méta-analyses, voir, par exemple, Diamond & Ling, 2016; Melby-Lervag & Hulme, 2013; Morrison Chein & Chein, 2011). Lors de chacune des sessions d'entraînement de 15 min (5 jours par semaine sur une période de 5 semaines), les participants du groupe d'entraînement au CI ont effectué une tâche de Stroop et de stop-signal, tandis que les participants du groupe CA ont effectué des tâches basées sur les connaissances de culture générale dont des questions de vocabulaire, grammaire et de calcul.

La difficulté des quatre tâches a été adaptée individuellement à la courbe d'apprentissage des participants. Au pré et au posttest, les enfants et les adolescents ont réalisé des tests de Stroop et de stop-signal informatisés pour mesurer l'efficacité du CI, et une IRM anatomique a été acquise pour chaque participant afin d'évaluer l'épaisseur et la surface du CPF (une région clef du réseau du CI, Aron et al., 2014). Nous nous sommes concentrés sur ces deux caractéristiques anatomiques du CPF car elles reflètent différents processus de maturation et sont soumises à des influences génétiques différentes (Panizzon et al., 2009; Raznahan et al., 2011), par conséquent elles pourraient donc être affectées différemment par l'entraînement au CI à différents âges (voir Jolles & Crone, 2012 pour un raisonnement similaire).

## **II. Méthode**

### **Participants**

Nous avons recruté 123 participants dans les écoles publiques : 64 enfants (27 garçons,  $M \pm SD = 9,8 \pm 0,56$  ans, tranche d'âge = 9-10 ans) et 59 adolescents (20 garçons,  $M = 16,4 \pm 0,52$  ans, tranche d'âge = 15-17 ans). Tous les participants étaient droitiers, conformément à l'inventaire d'Edinburgh (Oldfield, 1971), étaient nés à terme, avaient une vision normale ou légèrement corrigée, ne présentaient aucun antécédent de maladie neurologique et ne présentaient aucune

anomalie cérébrale. Les parents ou les tuteurs légaux ont donné leur consentement éclairé écrit et tous les enfants et adultes ont accepté de participer. Tous les participants ont été testés conformément aux normes nationales et internationales régissant l'utilisation de participants humains. Deux comités d'éthique ont approuvé notre étude (IRB 2015-A00383-46 et IRB 2015-A00811-48).

### **Les séances d'entraînements**

Les participants devaient effectuer des tâches de contrôle inhibiteur (groupe CI) ou des tâches basées sur les connaissances et le vocabulaire (groupe CA), pendant 15 minutes par jour, 5 jours par semaine pendant 5 semaines (25 sessions) sur une tablette tactile à la maison. Les participants ont été assignés au hasard aux groupes CI ou CA. Dans les groupes d'entraînement CI et CA, la difficulté a été progressivement augmentée et adaptée en temps réel à la courbe d'apprentissage de chaque participant afin de maintenir sa motivation et d'éviter toute automatisation (Buschkuehl, Jaeggi et Jonides, 2012; Green & Bavelier, 2008). Klingberg, 2010). Toutes les tâches ont été mises en œuvre sur la tablette à l'aide de E-prime 2.0. L'entraînement CI comprenait deux tâches impliquant le contrôle d'interférence (tâche de Stroop) et l'inhibition de la réponse (SST), car (a) le CI est multidimensionnel (Diamond, 2013) et (b) les effets de transfert peuvent être potentiellement plus importants lorsque la même fonction cognitive est entraînée avec différentes tâches (Buschkuehl et al., 2012; Green et Bavelier, 2008). Dans la tâche de Stroop, les participants devaient identifier la couleur de l'encre (par exemple, bleu) d'un mot affiché à l'écran indiquant une couleur en appuyant sur l'un des quatre boutons de couleur (bleu, vert, jaune, rouge) correspondant à la couleur sur la tablette tactile. La couleur du mot et la couleur de l'encre peuvent être congruentes (par exemple, BLEU écrit en bleu) ou incongruentes (par exemple, VERT écrit en bleu). De plus, nous avons conçu des stimuli de contrôle (c'est-à-dire un nom de couleur écrit en noir) pour lesquels les participants avaient pour instruction de lire le mot. Les stimuli de contrôle étaient destinés à forcer les participants à déterminer la couleur du mot tout au long des sessions d'entraînement. Les mots ont été présentés au centre de l'écran dans une police Bold Arial de 24 points. La difficulté augmentait pour les stimuli congruents et incongruents en fonction

de la durée du *Stimulus Onset Asynchrony* (i.e. SOA) qui diminuait entre la présentation du mot (écrit en gris clair) et sa coloration dans l'une des 4 couleurs à l'encre (bleu, jaune, vert, rouge et noir; voir par exemple, Appelbaum, Boehler, Davis, Won et Woldorff, 2014). Au début de l'entraînement, le SOA était fixé à 450 ms (niveau 1) et était diminué de 50 ms à chaque niveau de difficulté de la tâche (jusqu'à un SOA de 100 ms au niveau 8). À chaque niveau, les participants ont réalisé 13 éléments de contrôle, 13 éléments de Stroop congruents et 13 éléments de Stroop non congruents.

L'entraînement du groupe CA comprenait des tâches de difficulté croissante fondées sur les connaissances et le vocabulaire (voir Jaeggi, Buschkuhl, Jonides et Shah, 2011). Pour chaque tâche, des questions de type Les Incollables® à 4 choix ont été présentées, et les participants ont été invités à répondre en appuyant sur l'une des quatre réponses présentées à l'écran. Un maximum de 30 secondes était autorisé pour répondre à chaque question. Un pré-test en ligne effectué sur plus de 1600 enfants et adolescents nous a permis de sélectionner les questions attribuées à chacun des 8 niveaux de difficulté de chacune des deux tâches. Dix questions ont été présentées à chaque niveau. À la fin de chaque niveau, en fonction de la précision obtenue, les participants ont gagné des points qu'ils pouvaient échanger à la fin des 25 séances d'entraînement contre un petit cadeau (livres et cartes ou jeux de société). Dans les quatre tâches, la difficulté de la tâche augmentait lorsque les participants atteignaient 90% d'exactitude sur un niveau donné, elle diminuait lorsque les participants n'atteignaient pas une précision de 70% sur un niveau donné et restait la même lorsque les participants atteignaient une précision comprise entre 70% et 90% sur un niveau. Pour chaque tâche de chaque session d'entraînement, les participants ont commencé la session avec un niveau de difficulté inférieur à celui atteint au dernier niveau de la session précédente. À la fin de chaque séance, les participants devaient compléter une brève autoévaluation de leur motivation et de leur engagement au cours de la session. Pour déterminer si les adolescents et les enfants avaient progressé dans les groupes d'entraînement CI/CA, nous avons réalisé une analyse de variance ANOVA à deux facteurs : Session (première session par rapport à la dernière session) x Age (enfants par rapport à des adolescents) sur le niveau moyen de difficulté atteint par les participants aux deux tâches de la session dans les groupes CA et CI.

Pour le groupe CA, nous avons trouvé un effet principal de la séance d'entraînement,  $F(1,61) = 288,55$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,83$ , de l'âge,  $F(1,61) = 7,54$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,11$  et une interaction significative entre l'âge et la séance d'entraînement,  $F(1,61) = 8,53$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,12$ . Pour le groupe CI, nous avons trouvé un effet principal de la séance d'entraînement,  $F(1,64) = 182,8$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,74$ , mais aucun effet principal de l'âge,  $F(1, 64) = 3,39$ ;  $p = 0,07$ , mais pas d'interaction dans les deux sens,  $F(1,64) = 1,02$ ;  $p = 0,32$ . Il faut noter que les participants ont progressé entre la première et la dernière session d'entraînement dans les deux groupes.

### **Sessions pré et posttest**

Les participants ont exécuté deux tâches de contrôle inhibiteur lors des sessions de pré et posttest : une tâche de Stroop et une tâche de stop-signal. Les deux tâches ont été programmées avec E-prime 2.0, et réalisées individuellement sur un ordinateur portable avec une résolution de 1366 x 768 pixels et une fréquence de rafraîchissement de 60 Hz.

Dans la tâche de Stroop, nous avons conçu 16 stimuli (soit 4 stimuli congruents et 12 incongruents) en combinant quatre noms de couleur différents (rouge, vert, bleu et jaune) avec les quatre couleurs d'encre correspondantes (codes de couleurs RVB 255; 0; 0; 0; 255; 0; 0; 0; 255 et 255; 255; 0). Les stimuli étaient affichés au centre de l'écran en police Courier gras 24 points sur un fond gris (code RGB 135; 135; 135). Les participants ont été invités à identifier la couleur d'encre du mot affiché en appuyant sur l'un des deux boutons du clavier avec leurs index gauche et droit : les touches "s" pour les couleurs jaune et bleue et "l" pour les couleurs rouge et verte. Chaque clé était étiquetée avec un autocollant des couleurs correspondantes. Chaque essai commençait par la présentation d'une croix de fixation noire sur un fond gris pendant 1500 ms, puis l'un des mots de couleur était affiché pendant une durée maximale de 3000 ms. Les participants ont réalisé un bloc de 64 essais expérimentaux et deux blocs d'essais d'entraînement. Dans le premier bloc, les participants ont appris à associer chaque bouton de réponse à la couleur correspondante en appuyant sur la touche du clavier correspondant au point de couleur présenté à l'écran (chaque point de couleur a été présenté deux fois pour un total de 8 essais). Dans le deuxième bloc, les

participants ont présenté 6 stimuli de Stroop congruents et 6 éléments incongruents et ont reçu des commentaires sur l'exactitude de leur réponse. La présentation des essais a été randomisée dans les trois blocs d'essais. Nous avons séparément fait la moyenne des temps de réponse (TR) des essais congruents et incongruents correctement effectués pour chaque participant. Nous avons ensuite calculé pour chaque participant un score de Stroop, c'est-à-dire une différence de TR entre les éléments congruents et incongruents, les scores de Stroop les plus élevés indiquent une plus faible efficacité du CI.

Dans la tâche de stop-signal, chaque essai commençait par la présentation d'un cercle (250 ms). Une flèche a ensuite été présentée dans le cercle, et les participants ont été chargés d'appuyer le plus rapidement possible sur le bouton gauche de la souris lorsque la flèche pointait vers la gauche et le bouton droit de la souris lorsque la flèche pointait vers la droite, à moins qu'un signal auditif (i.e. stimuli stop, 750 Hz, 75 ms) ait été présenté avec des délais variables (i.e. retard du signal stop, SSD) après la présentation de la flèche. Le délai entre la présentation de la flèche et le signal stop a commencé à 250 ms et augmentait de 50 ms après un essai stop réussi (jusqu'à un retard de 1150 ms) et diminuait de 50 ms après un essai stop échoué (jusqu'à 50 ms retard). Chaque essai durait 2000 ms et les participants pouvaient donner leur réponse pendant toute la durée de l'essai. Les participants ont d'abord effectué un bloc d'entraînement de 32 essais (8 essais stop et les 24 essais go), puis trois blocs de 64 essais expérimentaux (16 essais stop et les 48 essais go par bloc). Dans la moitié des essais, la flèche pointait vers la gauche et dans l'autre moitié à droite. Pour chaque participant, nous avons calculé le temps de réaction de signal d'arrêt (SSRT) en soustrayant la médiane des TR des go réussis et la moyenne des SSD (Logan, Schachar, & Tannock, 1997). Tout comme la tâche de Stroop, les SSRT plus longs révèlent une efficacité moindre du CI.

La réceptivité à l'entraînement cognitif a été évaluée grâce à un score de changement relatif, à savoir  $= (\text{posttest} - \text{prétest}) / \text{prétest}$ . Pour chaque tâche, les scores des changements relatifs du score de Stroop ou du SSRT ont été examinés et les valeurs aberrantes ont été retirées à l'aide d'une approche non paramétrique : les valeurs inférieures à la médiane - 3 MAD ou supérieures à la médiane + 3 MAD (MAD : déviation absolue médiane). La valeur médiane de l'ensemble de l'échantillon dans chaque groupe d'âge, a été utilisée pour remplacer les données manquantes et

les valeurs aberrantes. Enfin, un score composite, combinant les scores des changements relatifs dans chaque tâche, a ensuite été calculé pour évaluer la composition générale du CI et permet de réduire la variance spécifique à la tâche. Ce score composite correspond à la somme des scores des changements relatifs de chaque tâche transformée en z-score.

### **Acquisition IRM**

Des données isotropes sagittale 3T d'IRM à haute résolution (1 x 1 x 1 mm) ont été acquises chez les enfants et les adolescents. Les données IRM d'enfants ont été acquises sur la plateforme d'imagerie biomédicale de Cyceron (Archieva, Philips Medical System, Pays-Bas). Avant les examens, les enfants étaient familiarisés avec le bruit d'une session IRM dans une fausse IRM et étaient formés à rester immobiles pendant l'acquisition. Pour réduire leurs mouvements, les enfants regardaient passivement un dessin animé sur un écran compatible avec l'IRM, réduisant ainsi les temps d'attente et offrant une expérience plus positive (Lemaire, Moran et Swan, 2009). Les données IRM des adolescents ont été acquises sur la plateforme d'imagerie biomédicale CIREN (General Electric Healthcare). Les paramètres de séquence ont été optimisés sur chaque site pour atteindre une acquisition similaire à Cyceron (TE = 3,3; TR = 7,2; angle de basculement = 9) et à CIREN (TE = 3,2; TR = 8,2; angle de basculement = 11).

### **Analyses des données IRM**

Les caractéristiques morphométriques de l'anatomie du cortex (Panizzon et al., 2009; Raznahan et al., 2011), à savoir l'épaisseur corticale (cortical thickness ou CT) et la surface corticale (cortical surface area ou CSA), ont été automatiquement obtenues grâce au logiciel FreeSurfer disponible gratuitement en téléchargement en ligne (<http://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/>).

Les images structurales pondérées en T1 ont été corrigées pour tenir compte des distorsions dues aux non-linéarités de gradient, enregistrées au coréographe, moyennées et rééchantillonnées de manière rigide afin de les aligner sur un cerveau de l'atlas. Les détails concernant la reconstruction

corticale basée en surface et la segmentation volumétrique sous-corticale ne sont pas présentés ici, mais ils peuvent être retrouvés sur le site internet ou dans la littérature (Dale, Fischl et Sereno, 1999; Fischl et Dale, 2000; Fischl, Sereno et Dale, 1999; Fischl, Sereno, Tootell et Dale, 1999. ; Fischl et al., 2004). Notez que ces procédures morphométriques ont été validées pour des enfants dès l'âge de 4 ans (Ghosh et al., 2010). Sur la base des examens IRM de chaque participant, un modèle 3D de la surface corticale a été construit. Ce modèle 3D comprenait la segmentation de la substance blanche, le *tesselage* de la limite de la substance grise/blanche, le gonflement de la surface plissée et *tessellée* et la correction des défauts topologiques. Les épaisseurs corticales ont été calculées à partir de cette reconstruction de la surface corticale en estimant puis en affinant la limite de la matière grise/blanche, en déformant la surface jusqu'à la surface plissée et en mesurant les distances de chaque point de la surface de la matière blanche à la surface plissée (Fischl & Dale, 2000). La CT a été calculée comme la distance la plus proche de la limite entre matière grise/blanche à la limite entre grise/CSF (ou *Cerebrospinal fluid*) à chaque sommet de la surface *tessellée* (Fischl & Dale, 2000). La CSA a été calculée au niveau de la surface plissée et représente l'aire du sommet sur la surface de la matière grise, calculée comme étant la moyenne de l'aire des triangles *tessellés* touchant ce sommet. Pour augmenter le rapport signal sur bruit, les caractéristiques de la surface corticale ont été extraites de l'atlas de Destrieux (Destrieux, Fischl, Dale et Halgren, 2010) et moyennées sur des régions du cortex préfrontal (CPF). L'anatomie de ces régions était auparavant associée à l'efficacité du CI (Fjell et al., 2012; Kharitonova, Martin, Gabrieli et Sheridan, 2013; Takeuchi et al., 2012; Westlye, Grydeland, Walhovd et Fjell, 2011).

### **Analyses statistiques**

Les scores des changements relatifs de la performance cognitive (score composite CI) et de l'anatomie du CPF (CT et CSA) après l'entraînement ont été analysés à l'aide de modèles linéaires comprenant le groupe d'entraînement (CI vs CA), le sexe (hommes vs femmes) et le groupe d'âge (enfant vs adolescent) en tant que facteurs catégoriels.

Pour vérifier si les changements cognitifs étaient parallèles aux changements anatomiques, la CT et la CSA spécifiques aux groupes d'entraînement, ont ensuite été analysées en utilisant un modèle linéaire incluant les changements relatifs dans les scores composites, en tant que covariable, avec le groupe d'entraînement (CI vs. CA), le sexe (Garçon contre fille) et l'âge (enfant contre adolescent) en tant que facteurs catégoriels. Les principaux effets et interactions ont été analysés avec des tests de F, et des comparaisons appariées post-hoc ont été sondées avec le test de Tukey HSD avec correction de Bonferroni. Une valeur de  $p$  bilatérale inférieure à 0,05 a été considérée comme statistiquement significative.

Des modifications relatives, plutôt que absolues, ont été utilisées dans les analyses pour contrôler la variabilité de base. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R 2.9 (<http://www.rproject.org/>) et les bibliothèques "car", "effects" et "Hmisc".

### III. Résultats

#### Changements de l'efficacité du CI

L'analyse des changements cognitifs après l'entraînement, évalués à partir du score composite basé sur la combinaison des changements relatifs des deux tâches effectuées au cours des sessions pré et posttest, a révélé une interaction à trois voies significative entre les groupes d'entraînement (CI vs CA), le sexe (garçon contre fille) et l'âge (enfant contre adolescent),  $F(1,115) = 6,19$ ;  $p = 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,05$  (voir tableau 3.1 et figure 3.1). Tous les autres effets principaux et d'interaction n'ont pas été significatifs,  $p > 0,12$ . Lorsque nous avons limité l'analyse aux enfants, nous avons observé une interaction bidirectionnelle significative entre les groupes d'entraînement (CI vs CA) et le genre (Garçons contre filles),  $F(1,60) = 4,72$ ;  $p = 0,03$ ;  $\eta^2 = 0,07$ . Nous avons constaté que le score composite CI était inférieur, et donc que les compétences inhibitrices du groupe CI étaient meilleures, au posttest qu'au prétest chez les garçons,  $T = 2,63$ ,  $p = 0,05$ , dans le groupe CI contrairement au groupe CA, ce qui n'est pas le cas chez les filles,  $T = 1,48$ ,  $p = .46$ . L'effet principal du facteur groupe d'entraînement,  $F(1,115) = 2,29$ ;  $p = 0,13$ , et du facteur sexe,  $F < 1$ , n'a pas révélé de signification. Les analyses ne prenant en compte que des adolescents, n'ont révélé aucun effet

principal de l'interaction entre les groupes d'entraînement,  $F < 1$ , et le sexe,  $F < 1$  ou d'interaction à deux facteurs entre les groupes d'entraînement et le sexe,  $F(1,55) = 1,85$ ;  $p = 0,18$ .

### **Changements de l'anatomie du CPF**

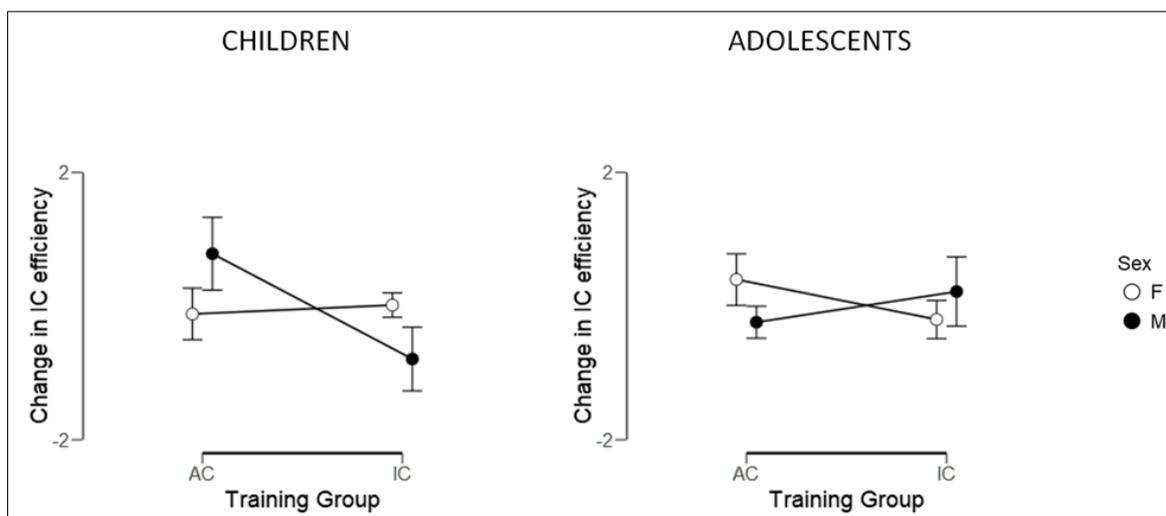
L'analyse de l'anatomie du cortex chez les enfants et les adolescents a révélé des modifications spécifiques de l'épaisseur corticale (CT) du gyrus insulaire gauche, du sillon orbitaire latéral droit, du pars orbitaire droit, du pars triangulaire gauche et du sillon orbitaire droit, la surface corticale (CSA) du pars triangulaire gauche, le segment inférieur droit du sillon insulaire circulaire, le frontal supérieur droit, le sillon orbitaire droit, le frontal inférieur gauche et le pars operculaire droit. En ce qui concerne les changements cognitifs, les changements dans l'anatomie des PFC étaient complexes et modulés par le groupe d'entraînement et l'âge et/ou le sexe des participants (voir le tableau 3.2 et la figure 3.2 pour plus de détails).

### **Associations entre les changements d'efficacité des circuits intégrés et les modifications de l'anatomie des PFC**

Enfin, nous avons étudié les associations possibles entre les changements d'efficacité du CI et les modifications de l'anatomie des CPF induites par l'entraînement. Nous avons observé des modifications de la CT du pars orbitaire droit et du CSA du pars triangulaire gauche, du sillon orbital droit et du pars operculaire droit associées aux modifications de l'efficacité du CI induites par l'entraînement modulé en fonction du groupe d'entraînement, de l'âge et/ou du sexe (voir les détails dans le tableau 3.3).

**Tableau 3.1:** Changement relatif dans l'efficacité au contrôle inhibiteur après un entraînement cognitif (CI vs CA) chez les enfants et les adolescents, selon le genre. Les scores de changement relatif sont reportés selon la moyenne  $\pm$  écartype.

	Children		Adolescents	
	IC training	AC training	IC training	AC training
Girls	0.015 $\pm$ 0.34	-0.118 $\pm$ 0.35	-0.200 $\pm$ 0.32	0.398 $\pm$ 0.35
Boys	-0.791 $\pm$ 0.40	0.783 $\pm$ 0.41	0.217 $\pm$ 0.47	-0.241 $\pm$ 0.47



**Figure 3.1 :** Variation relative des scores composites CI entre le pré et le posttest dans les groupes d'entraînements CA et CI chez les enfants et les adolescents, selon le genre. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur standard. Un changement relatif négatif des scores composites CI révèle une amélioration de l'efficacité du CI entre les deux temps de l'étude.

**Tableau 3.2 :** Résultats statistiques des modèles linéaires pour la comparaison des changements relatifs d'épaisseur corticale (CT) et de surface corticale (CSA) des régions CPF après l'entraînement. Les résultats sont présentés par ordre décroissant d'importance.

Morphometric feature	Factor in the linear model	Side	PFC region	F-value	P-value
CSA	Group x Age x Gender	Left	pars triangularis	9	0.003
CT	Group x Age x Gender	Left	short insular gyrus	7.9	0.006
CSA	Group x Age	Right	inf. segment of the insula circular sulcus	6.9	0.009
CT	Group x Gender	Right	lat. orbital sulcus	6.4	0.01
CSA	Group x Age x Gender	Right	superior frontal	6.2	0.01
CSA	Group x Age x Gender	Right	orbital sulcus	5.2	0.02
CSA	Group x Age x Gender	Left	inferior frontal	4.7	0.03
CSA	Group x Age x Gender	Right	pars opercularis	4.6	0.03
CT	Group x Age	Right	pars orbitalis	4.5	0.03
CT	Group x Age x Gender	Left	pars triangularis	4.3	0.04
CT	Group x Gender	Right	orbital sulcus	3.9	0.05

**Tableau 3.3 :** Résultats statistiques des modèles linéaires pour l'association des modifications relatives de l'efficacité du CI et des modifications de l'anatomie du CPF (épaisseur corticale [CT] et surface corticale [CSA] des régions PFC) après l'entraînement. Seules les régions CPF présentant des modifications spécifiques à un groupe après l'entraînement ont été analysées. Les résultats sont présentés par ordre décroissant d'importance. Cog: Changement relatif des scores composites CI

Morphometric feature	Factor in the linear model	Side	PFC Regions	F-value	p-value
CSA	Cog x Group x Age x Gender	left	pars triangularis	7.4	0.007
CSA	Cog x Group x Age	right	orbital sulcus	6.2	0.01
CT	Cog	right	pars orbitalis	5.8	0.02
CSA	Cog x Age x Gender	left	pars triangularis	4.6	0.03
CSA	Cog x Group x Age x Gender	right	pars opercularis	4.4	0.04



## IV. Discussion

Nous avons utilisé l'IRM structurale et une méthodologie longitudinale pour déterminer les effets sur l'anatomie du CPF d'un entraînement adapté informatisé intensif et individualisé chez les enfants d'âge scolaire et les adolescents. L'efficacité du CI évaluée grâce aux performances à des tâches inhibitrices entraînées (à savoir, la tâche de Stroop et tâche de stop-signal), a changé après l'entraînement en fonction du type d'entraînement suivi (CI ou CA), de l'âge et du sexe. En particulier, l'efficacité du CI des enfants s'améliore entre le pré et le posttest plus pour les garçons du groupe CI que pour le groupe CA, mais pas pour les filles. De plus, aucun changement de comportement lié à l'entraînement dans l'efficacité du CI n'a été observé chez les adolescents. Notez que dans notre étude, les changements de comportement dans l'efficacité du CI étaient limités aux garçons du groupe des enfants, tandis qu'au moins une étude rapportait une amélioration liée à l'entraînement à l'efficacité du CI chez les filles mais pas chez les garçons des enfants d'âge préscolaire (Liu et al., 2015). Pris dans leur ensemble, ces résultats suggèrent que les changements liés à l'entraînement du CI dépendent de l'interaction selon la période de développement pour laquelle l'entraînement est 'destiné' et selon le sexe des participants.

Au niveau structural du cerveau, nous avons observé des changements liés à l'entraînement du CI dans la CT et la CSA dans plusieurs sous-régions de CPF qui étaient spécifiques à l'âge et au sexe. En particulier, et conformément à une précédente étude d'IRM chez l'adulte (Chavan et al., 2015), nous avons observé des changements structuraux dans les pars operculaire, triangulaire et orbitaire du gyrus frontal inférieur (GFI), un épicode du CI chez l'adulte (par exemple, Aron et al., 2014), les adolescents et les enfants (Houdé et al., 2010). Il faut noter que ces changements structuraux semblaient être spécifiques à l'entraînement étant donné que les changements de CT et de CSA de ces régions GFI étaient associés à des changements comportementaux liés à l'entraînement du CI. Notre étude a fourni la première preuve des mécanismes neuroplastiques structuraux complexes à la base des changements comportementaux de l'efficacité du CI, entre le pré et le posttest chez les enfants d'âge scolaire et les adolescents. Bien que nous n'ayons pas directement évalué les transferts potentiels proches et lointains dans la présente étude, nous supposons que des effets de transfert au niveau comportemental pourraient être observés dans

les tâches qui dépendent des régions dans lesquelles nous avons observé des changements neuroplastiques.

Similairement aux mécanismes neuroplastiques observés pendant la maturation du cerveau (Giedd et Rapoport, 2010; Lenroot et al., 2007; Raznahan et al., 2011; Wierenga, Langen, Oranje et Durston, 2014), l'entraînement au CI a induit des modifications neuroplastiques liées au sexe et à l'âge, spécifiques à l'épaisseur corticale et la surface corticale (CSA ou CT). En effet, des études longitudinales par résonance magnétique chez des enfants et des adolescents en développement typique ont révélé des trajectoires de volumes de matière grise en forme de U inversé avec des tailles de pic se produisant à différentes périodes dans différentes régions (Giedd et Rapoport, 2010) avec un dimorphisme sexuel (Lenroot et al., 2007). La similitude entre les changements structuraux (et les facteurs qui affectent ces changements) observés pendant le développement et après l'entraînement cognitif pourrait suggérer que les changements dans les neurones, les cellules gliales et la myéline caractérisant les processus neuroplastiques observés au cours du développement pourraient également être à la base des processus neuroplastiques à la base de l'entraînement cognitif. Si tel est le cas, alors ce dernier et en particulier l'entraînement au CI peut affecter les mécanismes neurodéveloppementaux et améliorer le fonctionnement des circuits intégrés en accélérant le développement du cerveau (Denney, 1984; Jolles & Crone, 2012).

Enfin, nous avons trouvé des changements liés à l'entraînement du CI qui différaient en fonction de la caractéristique anatomique prise en compte, c'est-à-dire la CSA ou la CT, ce qui suggérerait que ces changements pourraient être supportés par différents mécanismes neuroplastiques. Ceci est cohérent avec "l'hypothèse d'unité radiale" (Rakic, 1988, 2000) qui suppose que la CSA d'une zone corticale donnée reflète essentiellement le nombre de colonnes corticales, tandis que la CT reflète essentiellement le nombre et la taille des cellules dans une colonne et la densité de remplissage, ainsi que le nombre de connexions et l'étendue de leur myélinisation. (Eickhoff et al., 2005; Rakic, 1988). La CSA peut aussi refléter un repliement, qui dépend de la division des cellules progénitrices dans la région périventriculaire au cours de l'embryogenèse (Chenn & Walsh, 2002) et la CT peut refléter l'arborisation et l'élagage dendritiques (Huttenlocher, 1990). Enfin, l'idée que les changements liés à l'entraînement du CI

pourraient être entretenus par différents mécanismes neuroplastiques est également corroborée par le fait que la CSA et la CT ont des origines génétiques différentes (Panizzon et al., 2009) et des trajectoires développementales distinctes (Raznahan et al., 2011; Wierenga et al., 2014).

Cette étude présente plusieurs limites qui appellent à la prudence lors de l'interprétation des résultats. Premièrement, nous nous sommes concentrés sur la structure du CPF pour mesurer l'effet lié à l'entraînement du CI, car le CPF est une région critique du réseau du CI fonctionnel (Aron et al., 2014; Houdé et al., 2010; Satterthwaite et al., 2013). Le CI, cependant, s'appuie non seulement sur le CPF mais aussi sur des régions corticales postérieures, telles que le lobule pariétal inférieur (Criaud & Boulinguez, 2013), le gyrus pariétal supérieur (Zhang, Geng et Lee, 2017), le gyrus fusiforme (Simmonds, Pekar et Mostofsky, 2008) et des structures sous-corticales, telles que les noyaux gris centraux, le thalamus et le cervelet (Dosenbach, Fair, Cohen, Schlaggar et Petersen, 2008; Niendam et al., 2012). Deuxièmement, malgré la taille importante des échantillons des enfants d'âge scolaire et des adolescents utilisés dans notre étude micro-longitudinale, les effets rapportés étaient modestes et la puissance statistique de nos analyses excluait les corrections des valeurs de p pour les comparaisons multiples, ce qui gonflait le risque d'erreur de Type 1. Cela dit, nous notons qu'une réduction de la taille de l'effet dans un échantillon plus important n'est pas rare dans les études en neuro-imagerie (Button et al., 2013), et que les faibles valeurs de l'effet observé dans les analyses de données IRM concordent avec les faibles valeurs de l'effet rapporté sur les changements liés à l'entraînement du CI observés au niveau comportemental. Troisièmement, les données d'IRM d'enfants et d'adolescents ont été acquises sur des scanners de force égale (3T) mais sur deux sites différents. Bien que les paramètres d'acquisition aient été optimisés pour produire des signaux aussi proches que possible de la résonance magnétique, il est difficile de démêler, dans la comparaison des données relatives aux enfants et aux adolescents, l'effet site de l'effet de l'âge, sauf lorsque nous avons étudié les modifications de la CSA et de la CT induites par l'entraînement, associées avec les changements de l'efficacité du CI, ce qui était critique dans l'analyse. Au vu de ces limites, il conviendrait de mener d'autres études sur des échantillons plus grands en utilisant une approche du cerveau complet pour les analyses et un site unique pour l'acquisition des données d'IRM structurale.

## **V. Conclusion**

En conclusion, nous fournissons la première preuve que des mécanismes neuroplastiques structuraux complexes dépendant de l'âge et du sexe pourraient favoriser des changements d'efficacité du CI à la suite d'un entraînement adapté informatisé intensif et individualisé de 5 semaines destiné aux enfants et adolescents. Les mécanismes neuroplastiques observés, après l'entraînement du CI chez les enfants d'âge scolaire et les adolescents, sont affectés par des facteurs similaires (à savoir, l'âge et le sexe) à ceux qui affectent la maturation du cerveau. Ainsi, l'entraînement pourrait améliorer le fonctionnement cognitif en accélérant le développement plutôt que de s'écarter de la trajectoire développementale typique (voir Jolles & Crone, 2012).

# DISCUSSION GÉNÉRALE

## I. Synthèse des résultats

Dans un premier temps, les résultats démontrent que les enfants du groupe CI améliorent leurs performances à la tâche de Stroop et de stop-signal entre les deux temps de l'étude, contrairement aux performances des enfants du groupe CA. En effet, les enfants du groupe CI s'entraînent à ces deux mêmes tâches. Par conséquent, cette progression spécifique aux performances des enfants du groupe CI est le reflet d'un effet de transfert très proche.

Dans un deuxième temps, les résultats soulignent un léger (i.e. non-significatif) effet de transfert proche dans la tâche de Flanker (i.e. ANT). Pour les enfants des deux groupes, les scores cognitifs à cette tâche diminuent entre le pré et le posttest. Cette baisse du score reflète un progrès des compétences cognitives. Par conséquent, cet effet de transfert s'avère être plutôt un effet test-retest. Parce que nous retrouvons le même effet pour les deux groupes.

Dans un troisième temps, les résultats mettent en évidence un effet de transfert lointain. En effet, pour la tâche de mémoire de travail *n-back* le nombre de bonnes réponses au niveau de difficulté le plus élevé (i.e. 3 *backs* ou N3) augmente significativement, uniquement pour les enfants du groupe CI entre les deux temps de l'étude. Ce résultat est en accord avec le fait que le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail se supportent réciproquement, et qu'il est rare que l'un des deux processus soit utilisés sans l'autre (Diamond, 2013). Dans la littérature, les auteurs distinguent trois principales composantes exécutives : la flexibilité cognitive, la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur. Ces processus exécutifs sont distincts tout en utilisant des ressources cognitives communes (Sanne et al., 2013). Cet aspect a donc donné naissance au modèle "Unité

et Diversité" des fonctions exécutives (Miyake et al., 2000). Ce modèle considère que celles-ci, pourraient être divisées en composantes unitaires qui se chevauchent, tout en étant distinctes à la fois (Maraver et al., 2016). Par conséquent, un entraînement au contrôle inhibiteur pourrait également induire l'entraînement des capacités de mémoire de travail. Cet effet de transfert est confirmé grâce aux analyses réalisées sur les données de l'entraînement. Il existe une relation causale entre le niveau atteint à la tâche de Stroop à la fin de l'entraînement et (1) le nombre de bonnes réponses à la tâche *n-back* au prétest, (2) le nombre de bonnes réponses à la tâche *n-back* au posttest). Autrement dit, plus le nombre de bonnes réponses aux 3 *backs* aux deux temps de l'étude est élevé, plus le niveau atteint à la tâche de Stroop à la fin de l'entraînement est élevé, et uniquement pour les enfants du groupe CI.

Et enfin, à l'aide de l'IRM structurale, nous avons analysé les effets d'un entraînement adapté, informatisé, intensif et individualisé chez les enfants d'âge scolaire et chez les adolescents, sur l'anatomie cérébrale au niveau du cortex préfrontal. Plus particulièrement, l'efficacité du contrôle inhibiteur des enfants s'améliore entre le pré et le posttest pour les garçons du groupe CI plus que pour le groupe CA, mais pas pour les filles. Alors que chez les adolescents, suite à l'entraînement, il n'y a pas de changement dans les capacités inhibitrices. Nous en avons conclu que les répercussions liées à l'entraînement du contrôle inhibiteur dépendent de l'interaction selon la période de développement entraînée (i.e. chez des enfants ou chez des adolescents) et selon le sexe des participants (i.e. fille ou garçon). Ensuite au niveau de l'anatomie cérébrale du cortex préfrontal, nous avons observé des modifications structurales au niveau de l'épaisseur corticale (*cortical thickness* ou CT en anglais) et de la surface corticale (*cortical surface area* ou CSA en anglais) dans le gyrus frontal inférieur (i.e. les pars operculaire, triangulaire et orbitaire). Cette région cérébrale correspond au réseau clef du contrôle inhibiteur chez les adultes, les adolescents et les enfants (Houdé et al., 2010; Aron et al., 2014; Chavan et al., 2015). Ces changements d'anatomie sont directement liés à l'entraînement du contrôle inhibiteur et ils sont spécifiques à l'âge et au sexe. Pour conclure, ces mécanismes neuroplastiques observés, après l'entraînement du CI chez les enfants d'âge scolaire et chez les adolescents, sont affectés par des facteurs similaires (à savoir, l'âge et le sexe) à ceux qui affectent la maturation du cerveau (Lenroot et al.,

2007; Giedd & Rapoport, 2010; Raznahan et al., 2011; Wierenga et al., 2014). Ainsi, l'entraînement pourrait améliorer le fonctionnement cognitif en accélérant le développement plutôt que de s'écarter de la trajectoire développementale typique (voir Jolles & Crone, 2012).

## **II. Critiques des analyses statistiques**

Les études, analysant les répercussions de l'entraînement cognitifs sur les compétences comportementales, utilisent (généralement) pour leurs analyses statistiques un score de différence, c'est-à-dire une soustraction entre par exemple le temps de réponse moyen au pré et au posttest (i.e. post – pré). En effet ce calcul permet de rendre compte des variations, donc de la progression (ou non), des scores entre les deux temps d'étude. Malheureusement, dans notre étude les analyses statistiques faites avec ces mêmes scores ne démontrent aucun effet significatif. Par conséquent, nous avons adapté nos plans d'analyses, en décidant d'utiliser comme indice comportemental les scores cognitifs du prétest et du posttest. Cependant, nous avons soulevé que dans la littérature il existait une très grande variabilité de résultats en lien avec la grande variabilité du choix dans les matériels et les méthodes. Or, nous même n'avons pas pu suivre les méthodes 'standards' utilisées. L'objectif était, qu'en changeant d'approche, nous puissions expliquer et mieux comprendre ce manque d'effet avec les scores de différence. Il faut noter que ceci ne nous a pas empêché de mettre en lumière un effet de transfert lointain sur les capacités de mémoire de travail uniquement pour le groupe CI.

De plus, il est fréquent que les chercheurs décident de séparer leur groupe expérimental en fonction des performances cognitives des participants au prétest (Jaeggi et al., 2011). Cette séparation a pour but de regrouper, en se basant sur les performances au prétest, dans un premier sous-groupe les participants avec de bonnes capacités cognitives et dans un deuxième sous-groupe ceux avec de moins bonnes capacités. Grâce à cela, les chercheurs peuvent évaluer les gains de l'entraînement sur les performances au posttest, tout en ayant pris en compte les performances au prétest et donc les différences intra-individuelles. Nous avons fait le choix (pour

cette thèse) de ne pas départager notre groupe d'enfants CI. À nos yeux, en différenciant les 'bons' des 'mauvais' inhibiteurs, nous aurions par conséquent deux groupes de très petit effectif (environ  $n = 11$ ), nous faisant perdre de la puissance statistique. Néanmoins, il reste intéressant de procéder ainsi pour nos analyses futures. Surtout que désormais, suite aux résultats révélés dans les études n°1, n°2 et n°3, il semble logique de différencier les enfants du groupe CI selon leurs performances cognitives du prétest.

Une autre critique que nous pouvons apporter sur nos analyses statistiques, est le fait nous n'avons pas vérifié l'influence du statut socio-économique sur les effets de transfert induits par l'entraînement. Nous justifions ce choix par le fait qu'étudier les effets du statut socio-économique ne représentait pas le thème central de cette thèse. Cependant, ce point est particulièrement intéressant à étudier. Grâce aux trois questionnaires remplis par les parents des enfants volontaires, nous disposons de ces informations. Nous allons donc pouvoir par la suite réaliser ce type d'analyses. De fait, il a été montré que celui ci avait un impact sur les capacités cognitives (Noble et al., 2005 & 2007; Roberts et al., 2007; Han & Northoff, 2008; Choudhury, 2010; Noble et al., 2015). En effet, une étude a mis en évidence que dans des familles à faible revenu, si les variations dans les revenus entre ce groupe de familles étaient faibles, alors les enfants présentaient des différences relativement importantes au niveau de la surface corticale. À l'opposé, dans des familles à revenu élevé, ces différences de surface corticale chez les enfants étaient moins importantes (Noble et al., 2015). De plus, ces variations cérébrales étaient davantage en relation avec les régions impliquées dans les fonctions exécutives, le langage et la lecture. Par conséquent, le milieu environnant ainsi que la culture induisent des différences dans l'organisation cérébrale (Mata et al., 2016).

### **III. Biais liés aux contraintes du protocole**

La participation à ce protocole de recherche impliquait d'assister à deux rendez-vous de 4 heures (pour les deux examens IRM) et de gérer les entraînements sur la tablette pendant 1 mois.

Ceci induisait une véritable organisation de la part des familles volontaires. Par conséquent, plusieurs familles n'ont pas pu participer uniquement pour des raisons de logistique. Effectivement, chaque protocole de recherche implique une sélection dans le recrutement. Premièrement et logiquement, parce que les recherches comportent toutes une liste de critères d'inclusion et de non-inclusion, sélectionnant les participants en fonction de l'objectif de la recherche (i.e. l'âge, le sexe, etc.). Deuxièmement, il existe une sorte de sélection sous-jacente, qui peut-être schématiquement qualifiée de 'sélection confondante'. Ici, seulement les familles capables et ayant envie de s'organiser autour des contraintes du protocole ont pu prendre part au projet. Malheureusement, il n'existe pas réellement de solution pour contrer cet aspect du recrutement, mais il faut toutefois le garder à l'esprit au cours de l'interprétation des résultats. Ce point justifie, à nouveau, l'importance d'évaluer les effets du statut socio-économique des participants sur les mesures d'intérêt de notre recherche.

Une autre contrainte était la longueur de la batterie de tâche cognitive. Pour ce travail de thèse, nous avons sélectionné des tâches en fonction de nos hypothèses. Celles-ci représentent seulement une partie de l'ensemble de la batterie de tests (qui durait en moyenne deux heures). Le but, tout à fait louable, était de pouvoir avoir un profil cognitif complet des enfants volontaires. Le revers de la médaille était qu'avant la fin de la batterie, les enfants étaient fatigués 'cognitivement'. On retrouve cet impact de la fatigue dans les résultats de nos analyses statistiques pour la tâche présentée en avant dernière, c'est-à-dire la tâche Simon. En d'autres termes, les enfants ne présentent aucune amélioration entre le pré et le posttest, et quel que soit leur groupe d'entraînement.

#### **IV. Critiques et améliorations des entraînements**

##### **a. Adaptation des entraînements**

L'une des critiques principales de nos études, est que les tâches proposées pour l'entraînement du groupe CI ne semblent pas adaptées aux capacités inhibitrices des enfants. Effectivement, pour la tâche de Stroop entraînée les enfants atteignent très facilement le niveau

maximum. Alors qu'à l'inverse, pour la tâche de stop-signal entraînée le niveau des enfants stagne. Par conséquent, l'une des tâches est trop facile et l'autre trop difficile pour eux. En effet, la difficulté croissante est indispensable pour empêcher l'automatisation des processus cognitifs, mais également pour empêcher la mise en place de stratégies (Green & Bavelier, 2008; Klingberg, 2010; Enriquez-Geppert et al., 2013). De plus, pour que l'entraînement soit efficace, les capacités cognitives doivent être challengées tout au long de la durée de l'apprentissage (Diamond & Lee, 2011; Diamond & Ling, 2016). Ces points fondamentaux sont donc confirmés par nos résultats, puisque qu'on ne trouve que des effets très faibles de transfert proche à la suite de l'entraînement.

## **b. Motivation et effets placebo**

Les résultats de l'étude n°2 démontrent une baisse significative du degré de motivation pour les deux groupes d'enfants entre le début et la fin de l'entraînement. Cette perte de motivation a sans nul doute influencé négativement les effets de l'entraînement. En effet, il n'est plus à prouver que le niveau de motivation a un impact sur la réceptivité à l'entraînement (Eysenck & Calvo, 1992; Verbruggen & Houwer, 2007; Locke & Braver, 2008; Pessoa et al., 2009). Par conséquent motiver les participants aux études est primordial. Ainsi, certains chercheurs mettent l'accent sur le fait de 'booster' l'implication des volontaires, comme par exemple mettre en place une rémunération en échange de leur participation. Néanmoins, cette solution peut induire des effets négatifs sur l'engagement des volontaires, parce qu'ils seraient plus motivés par le gain que par l'entraînement en tant que tel (Foroughi et al., 2016). À l'opposé, de ces effets négatifs sur la motivation, il y a les effets placebo. Par exemple, lorsqu'il était explicitement dit aux participants que l'entraînement qu'ils allaient suivre allait forcément induire une amélioration de leurs performances cognitives. Après une heure d'entraînement à la mémoire de travail, ces participants présentaient de meilleures performances d'intelligence fluide en comparaison aux participants à qui les chercheurs n'avaient pas du tout explicité cette amélioration (Foroughi et al., 2016). Ainsi, ce résultat met en lumière le fait qu'il est possible que les effets placebo se confondent avec les effets d'un entraînement (Boot et al., 2013). De ce fait, nous pouvons émettre

l'hypothèse que les effets de transfert lointain (aux tâches de problèmes arithmétiques) pour le groupe contrôle actif sont peut-être le résultat des effets placebo.

### **c. Le futur des entraînements cognitifs : les jeux vidéo**

Une des explications de la baisse de motivation est également reliée à la forme des entraînements. Effectivement, les tâches ont été programmées par les membres du laboratoire. Elles sont donc très épurées. Par conséquent, les enfants trouvent les entraînements monotones et ils sont très rapidement lassés. Il faudrait donc améliorer les visuels des entraînements, en les rendant plus attractifs et plus dynamique. L'une des pistes les plus prometteuses est les jeux vidéo. De nombreuses études ont mis en évidence le fait qu'il était tout à fait possible d'utiliser les jeux vidéo sous forme d'entraînement cognitif.

Par exemple, des chercheurs ont utilisé le jeu vidéo Tétris® comme entraînement cognitif chez des adolescents (Haier et al., 2009). Les résultats de cette étude démontrent une augmentation de l'épaisseur corticale après 3 mois d'entraînement (en moyenne 1,5 heures par semaine). Dans une autre étude, les auteurs ont eu recours au jeu vidéo Fruit Ninja® pour évaluer les effets de l'entraînement de l'inhibition à la réponse et les effets de transfert chez les jeunes enfants (entre 4 et 5 ans) (Liu et al., 2015). Ils ont choisi ce jeu vidéo pour ces traits de ressemblance avec une tâche de go/no-go. Les enfants ont été réparti en deux groupes : dans le groupe suivant un entraînement de 15 minutes par jour, 4 jours par semaine et pendant 3 semaines ; ou dans le groupe contrôle actif. Les résultats démontrent que les performances au jeu Fruit Ninja® augmentent significativement entre les deux temps de l'étude, Cette progression est associée à un effet de transfert, c'est-à-dire une amélioration des performances aux matrices de RAVEN entre les deux temps de l'étude pour le groupe d'entraînement. Et enfin, des chercheurs ont créé eux même un jeu vidéo permettant d'entraîner les capacités de flexibilité cognitive, appelé The Alien Game (Homer et al., 2017). Des lycéens américains (entre 14 et 18 ans) ont suivi un entraînement à ce jeu pendant 5 minutes par jour, pendant 6 semaines. Les résultats mettent en évidence une amélioration significative des capacités cognitive à la tâche de Flanker et la DCCS

(*Dimensional Change Card Sort*) pour le groupe ayant joué au jeu *The Alien Game* entre le pré et le posttest. De ce fait, le jeu *The Alien Game* permet d'améliorer les fonctions exécutives. Ainsi, cette étude montre que les jeux vidéo peuvent être des outils efficaces pour développer les compétences cognitives lorsqu'ils sont explicitement conçus à cette fin.

Cependant, il est vrai que dans l'opinion générale les jeux vidéo renvoient une image négative, très souvent associée à l'agressivité ou à des comportements addictifs (Strasburger et al., 2010). Pourtant, une étude a montré que des étudiants jouant 5 heures par semaine aux jeux vidéo sont plus rapides à une tâche d'attention soutenue qu'un groupe d'étudiant qui n'y jouent pas (Dye et al., 2009). De ce fait, les jeux vidéo peuvent fournir une alternative idéale à, dans notre cas, à la baisse de motivation. Effectivement, les entraînements pourraient avec les mêmes caractéristiques qu'un jeu vidéo, c'est-à-dire l'aspect visuel, interactif, attractif, etc., tout en entraînant les fonctions exécutives améliorer les capacités cognitives. En d'autres termes, il faudrait utiliser les aspects positifs des jeux vidéo en les combinant à des tâches évaluant et permettant d'entraîner les fonctions exécutives. Ceci n'est pas totalement novateur, puisque ce type de jeux vidéo existent déjà (*serious games* ou *serious gaming* en anglais). Cependant ces jeux doivent être encore largement développés grâce à un travail commun regroupant l'industrie des jeux vidéo et la discipline des neurosciences.

## **V. Futures analyses**

### **a. Analyses sur le reste de la batterie de tests cognitifs**

Dans les travaux de cette thèse nous n'avons utilisé qu'une partie de l'ensemble des données du projet APEX. Comme nous l'avons précisé dans les chapitres précédents, les tâches que nous avons sélectionnées pour nos analyses statistiques (afin de répondre à nos hypothèses) font partie d'une batterie de tests cognitifs complète. Par conséquent, des analyses complémentaires seront réalisées avec les tests restant, notamment avec une deuxième tâche de mémoire de travail *DOT Task* du fait que les présentes analyses démontrent un effet de transfert lointain à la tâche *n-back*. Cette batterie comportait aussi d'autres tests d'inhibition qui feront

l'objet d'analyses ultérieures, tel que la tâche de Stroop Émotions. Pour celle-ci, les enfants doivent déterminer l'émotion du visage qui apparaît sur l'écran de l'ordinateur (i.e. joie, tristesse, peur et colère), tout en inhibant le mot qui est écrit en dessous de ce visage. Ces mots peuvent être congruents, c'est-à-dire identique à l'émotion du visage, ou incongruents, c'est-à-dire différent de l'émotion du visage.

### **b. Analyses des données des entraînements sur tablette**

Ensuite, comme nous l'avons déjà mentionné, plusieurs études d'approfondissement sont nécessaires. Par exemple, il faudrait examiner les données de l'entraînement. Grâce à cette étape, nous pourrions calculer le score d'interférence ou le SSRT pour chaque séance, afin d'utiliser ces scores dans les analyses plutôt que le meilleur niveau atteint. Nous pourrions également, vérifier les temps de réponses aux items go à la tâche de stop-signal. Enfin, il serait primordial d'évaluer l'effet du statu socio-économique sur la réceptivité à l'entraînement.

### **c. Analyses du reste des données IRM**

De plus, nous nous sommes focalisés sur l'IRMa, marqueur trait de la plasticité neuronale, afin de mesurer les changements macroscopiques observés au niveau cérébral anatomique suite à l'apprentissage cognitif. Mais il serait toutefois intéressant et pertinent d'analyser toutes les autres mesures d'imagerie cérébrale, telles que l'imagerie de diffusion, l'imagerie fonctionnelle d'activation et de repos.

### **d. Analyses avec un groupe d'adolescents**

Par ailleurs au sein du laboratoire, un deuxième projet similaire au projet APEX présenté ici a été réalisé en parallèle. Ce projet-ci similaire par l'entraînement, la batterie de tests et l'examen IRM, a été réalisé chez des adolescents. L'intérêt est de pouvoir comparer ces deux jeux de données : celui des enfants et des adolescents. C'est ce que nous avons fait pour l'étude n°3.

Grâce à l'ajout de ce groupe d'adolescents nous allons pouvoir bénéficier d'une plus grande puissance statistique, et d'appréhender l'aspect développemental des effets de l'entraînements.

#### **e. Mise en place d'un posttest différé**

À l'avenir, il serait intéressant d'examiner la stabilité des effets induits par l'entraînement à l'aide d'un posttest différé. Par conséquent un suivi longitudinal, permettrait d'évaluer la capacité à s'améliorer ainsi que la motivation qui peuvent mettre un certain temps à s'établir (Holmes et al., 2009; Van der Molen et al., 2010).

## **VI. Vers l'éducation**

Les résultats des études de l'entraînement des fonctions exécutives sont prometteurs pour le champ de l'éducation. En effet, plusieurs études ont démontré les effets bénéfiques de l'entraînement à la mémoire de travail dans plusieurs groupes d'âge (Borella et al., 2010; Söderqvist et al., 2012; Jaeggi et al., 2013) avec des effets de transfert proche et lointain, notamment sur les performances de mathématiques (Dahlin, 2013 ; Bergman-Nutley & Klingberg, 2014), les capacités de lecture (Chein & Morrison, 2010; Dahlin, 2010; Loosli et al., 2012; Karbach et al., 2015), le raisonnement ou l'intelligence fluide (Klingberg et al., 2005 ; Borella et al., 2010; Jaušovec & Jaušovec, 2012; Au et al., 2014; Chooi & Thompson, 2012; Harrison et al., 2013; Redick et al., 2013; Melby-Lervåg & Hulme, 2013; Bogg & Lasecki, 2015; Schwaighofer et al., 2015; Dougherty et al., 2016). D'autres études se sont concentrées sur l'entraînement au contrôle inhibiteur (Spierer et al., 2013). Plusieurs de ces études n'ont pas trouvé d'effets de transfert comportemental après un entraînement au contrôle inhibiteur (Thorell et al., 2009; Berkman et al., 2014; Enge et al., 2014). Cependant, d'autres études ont montré des effets bénéfiques de transfert de proche et lointain après un entraînement à la flexibilité cognitive chez des d'individus en bonne santé (Karbach & Kray, 2009). D'autres encore ont mis en évidence des effets bénéfiques

liés à un entraînement exécutif sur les scores d'intelligence fluide chez des enfants (Rueda et al., 2005 & 2012; Liu et al., 2015). Et enfin, d'autres chercheurs ont démontré des effets de transfert proche chez les enfants en développement 'typique' (Dowsett & Livesey, 2000) ou avec des déficits de contrôle exécutif (Kray et al., 2012).

Malgré les résultats très diversifiés dans les effets induits par l'entraînement au contrôle inhibiteur, nous saons que l'inhibition joue un rôle primordial dans les apprentissages scolaires (Lubin et al., 2013 & 2016; Borst et al., 2015; Lanoë et al., 2016; Roell et al., 2017 & 2018). Par exemple, la résolution de problèmes arithmétiques peut poser un problème pour les enfants lorsque les énoncés de ces problèmes impliquent un conflit (cf. Lubin et al., 2013). Ce conflit correspond à l'heuristique induite par l'énoncé, c'est-à-dire de faire une addition quand l'énoncé contient "plus que" ou une soustraction quand il contient "moins que". La capacité d'inhiber cette heuristique devient plus efficace avec l'âge, par conséquent elle permet aux adultes de faire moins d'erreurs. En conclusion, cette heuristique induite par la forme de l'énoncé se construit et se renforce sûrement dans les apprentissages scolaires précédents. Ceci crée une preuve tangible que, d'un point de vue pédagogique, les enfants avec des difficultés face aux problèmes arithmétiques n'ont pas forcément de déficit en mathématiques mais plutôt qu'ils présentent un défaut d'inhibition. Il existe également un lien entre les capacités inhibitrices dans un autre domaine scolaire. Par exemple, dans la tâche de grammaire où ici encore il faut inhiber une heuristique sur-apprise qui implique de mettre automatiquement au pluriel le mot qui suit le déterminant "les" (e.g. "Je les manges" vs "Je les mange") (Lanoë et al., 2016). Par conséquent, dans les apprentissages scolaires il faut parfois inhiber une heuristique sur apprise, de ce fait ceci à tous âges. Donc, dans le contexte éducatif le fait d'entraîner à identifier et à inhiber des heuristiques trompeuses en faveur d'une réponse plus logique semblerait pertinent. Certaines études ont démontré une diminution des erreurs systématiques et de raisonnement (Houdé et al., 2000 & 2007; Brault et al., 2015). Par exemple, les chercheurs ont montré une réorganisation cérébrale suite à un entraînement au contrôle inhibiteur de 20 minutes à une tâche de raisonnement, chez l'adulte (Houdé et al., 2000). Cette réorganisation de l'activation cérébrale change pour un réseau initialement basé au niveau des aires visuelles, reflétant des erreurs de

biais visuels, pour un réseau situé au niveau du cortex préfrontal, reflétant le recrutement des capacités exécutives et plus particulièrement le contrôle inhibiteur. Cette étude prouve donc qu'il est possible d'entraîner les capacités inhibitrices à résister aux automatismes et d'intégrer ce type d'entraînement dans un contexte pédagogique, puisqu'améliorer les performances au contrôle inhibiteur permettrait de passer d'un raisonnement biaisé à un raisonnement logique.

De plus, pour mieux comprendre les différences intra et interindividuelles dans la mise en place des apprentissages scolaires, il faut, en plus des données comportementales, prendre en compte les données cérébrales au niveau structural (Fornito et al., 2004; Cacia et al., 2014; Borst et al., 2014; Tissier et al., 2018). En effet, en étudiant la morphologie sulcale du cortex cingulaire antérieur, des chercheurs ont mis en évidence une influence de ce dernier sur les performances cognitives à la tâche de Stroop chez des enfants, âgés de 5 ans (Cacia et al., 2014). Les enfants avec un motif asymétrique présentaient de meilleures performances d'inhibition que les enfants avec un motif symétrique. D'autres chercheurs de la même équipe, ont démontré que cette influence était pérenne du fait qu'ils ont retrouvé ces mêmes différences de performances chez ces mêmes enfants âgés cette fois de 9 ans (Borst et al., 2014). Une autre étude a également mis en avant l'impact de l'asymétrie du sillon frontal inférieur sur les capacités inhibitrices (Tissier et al., 2018). Par conséquent, il existe une contrainte cérébrale précoce ayant un effet sur les compétences cognitives. De ce fait, les études sur les effets de l'entraînement ont toutes leur importance, car elles ont le potentiel de contrer cette contrainte précoce.

Pour conclure, l'entraînement cognitif est par définition destiné aux individus souhaitant prévenir l'apparition de déficits ou améliorer leurs capacités cognitives. Ainsi, l'entraînement cognitif semble idéal et très prometteur dans le cadre pédagogique.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Les fonctions exécutives jouent un rôle primordial dans de nombreux domaines, notamment dans les apprentissages scolaires (Dennis, 1989; Blair & Razza, 2007; Moffitt et al., 2011; Carlson & Moses, 2013; Kim et al., 2013; Reinert et al., 2013; Bull & Lee, 2014; Cragg & Gilmore, 2014; Liang et al., 2014). De ce fait, entraîner les compétences cognitives dans le but de les améliorer est attrayant, et cela permettrait par exemple de compenser des déficits cognitifs. Par conséquent, les études des effets de l'entraînement cognitif ont connu un essor depuis ces dernières années. Cependant dans la littérature, il n'y a pas de consensus sur les effets de transfert proche et/ou lointain induits par un entraînement (Jaeggi et al., 2008; Karbach & Kray, 2009; Thorell et al., 2009; Berkman et al., 2014; Karbach & Unger, 2014; Au et al., 2015; Liu et al., 2015; Traverso et al., 2015; Wilkinson et al., 2015; Homer et al., 2017; Souders et al., 2017). De plus, très peu d'études ont utilisé une approche multimodale. C'est donc le but de cette thèse : étudier les effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur sur le développement cognitif et les apprentissages scolaires chez l'enfant au niveau comportemental, en analysant les effets de transfert proche et lointain. Nous avons également réalisé des analyses au niveau de l'anatomie cérébrale (i.e. IRMa), en examinant les changements macroscopiques induits par l'entraînement. Pour cela, nous avons eu recours à une méthodologie expérimentale classique d'apprentissage micro-longitudinale avec un prétest (Évaluation cognitive-1 et IRM-1), un apprentissage à la maison (sur tablette tactile), et un posttest immédiat (à la fin de l'apprentissage, Évaluation cognitive-2 et IRM-2). Nous avons sélectionné deux groupes d'enfants âgés de 9 à 10 ans, ils ont suivi un entraînement intensif de 15 minutes par jour, 5 jours par semaines pendant 5 semaines consécutives. Nous avons comparé un groupe contrôle actif (questions de culture générale) à un groupe expérimental, ayant suivi un

entraînement au contrôle inhibiteur 'pur' (Stroop et stop-signal). Les résultats démontrent une amélioration significative des performances aux tâches entraînées dans le groupe expérimental, mais pas dans le groupe contrôle actif. D'autre part, nous avons également constaté un effet de transfert lointain uniquement pour le groupe expérimental. Les enfants améliorent leurs compétences de mémoire de travail (*n-back*). Et enfin, au niveau cérébral, nous avons comparé notre groupe d'enfants à un groupe d'adolescents (16-17 ans), ayant suivi un protocole de recherche identique à celui des enfants. Cette étude met en évidence pour la première fois, la preuve que les mécanismes neuroplastiques structuraux complexes, dépendants de l'âge et du sexe, pourraient favoriser les changements d'efficacité du contrôle inhibiteur à la suite d'un entraînement, chez des enfants et des adolescents. Ces mécanismes neuroplastiques sont influencés par des facteurs similaires (i.e. l'âge et le sexe) à ceux affectant la maturation du cerveau (Lenroot et al., 2007; Giedd & Rapoport, 2010; Raznahan et al., 2011; Wierenga et al., 2014). Ainsi, l'entraînement pourrait améliorer le fonctionnement cognitif en accélérant le développement plutôt qu'en s'écartant de la trajectoire développementale typique (Jolles & Crone, 2012). In fine, les résultats de ces études pourraient avoir des perspectives translationnelles, comme par exemple vers l'éducation. En effet, il a été prouvé que l'inhibition était cruciale dans les apprentissages scolaires (Lubin et al., 2013 & 2016; Borst et al., 2015; Lanoë et al., 2016; Roell et al., 2017 & 2018). Ainsi, créer des programmes permettant d'améliorer les capacités inhibitrices pourrait être utile au niveau éducatif. En conclusion, les études des effets de l'entraînement ont un avenir prometteur, grâce notamment aux résultats encourageants de nos recherches. Malgré cela, d'autres études sont tout de même nécessaires afin d'approfondir nos connaissances sur ces effets liés à l'entraînement cognitif.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abutalebi, J., Della Rosa, P. A., Green, D. W., Hernandez, M., Scifo, P., Keim, R., Costa, A. (2012). Bilingualism Tunes the Anterior Cingulate Cortex for Conflict Monitoring. *Cerebral Cortex*, 22(9), 2076-2086. doi.org/10.1093/cercor/bhr287
- Alderson, R. M., Rapport, M. D., Hudec, K. L., Sarver, D. E., & Kofler, M. J. (2010). Competing Core Processes in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD): Do Working Memory Deficiencies Underlie Behavioral Inhibition Deficits? *Journal of Abnormal Child Psychology*, 38(4), 497-507. doi.org/10.1007/s10802-010-9387-0
- Alexander, M. P., & Stuss, D. T. (2000). Disorders of Frontal Lobe Functioning. *Seminars in Neurology*, 0(04), 427-438. doi.org/10.1055/s-2000-13175
- Allan, J. A. (2018). *An analysis of Daniel Kahneman's Thinking, fast and slow*. Abingdon New York: Routledge.
- Anderson, P. (2002). Assessment and Development of Executive Function (EF) During Childhood. *Child Neuropsychology*, 8(2), 71-82. doi.org/10.1076/chin.8.2.71.8724
- Appelbaum, L. G., Boehler, C. N., Davis, L. A., Won, R. J., & Woldorff, M. G. (2014). The dynamics of proactive and reactive cognitive control processes in the human brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(5), 1021-1038.
- Aron, A. R. (2006). Cortical and Subcortical Contributions to Stop Signal Response Inhibition: Role of the Subthalamic Nucleus. *Journal of Neuroscience*, 26(9), 2424-2433. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4682-05.2006
- Aron, A. R., Durston, S., Eagle, D. M., Logan, G. D., Stinear, C. M., & Stuphorn, V. (2007). Converging Evidence for a Fronto-Basal-Ganglia Network for Inhibitory Control of Action and Cognition. *Journal of Neuroscience*, 27(44), 11860-11864. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3644-07.2007
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014). Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), 177-185.

- Aron, Adam R., Fletcher, P. C., Bullmore, E. T., Sahakian, B. J., & Robbins, T. W. (2003). Erratum: Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans. *Nature Neuroscience*, 6(2), 115-116. doi.org/10.1038/nn1003
- Aron, Adam R., Herz, D. M., Brown, P., Forstmann, B. U., & Zaghloul, K. (2016). Frontosubthalamic Circuits for Control of Action and Cognition. *The Journal of Neuroscience*, 36(45), 11489-11495. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2348-16.2016
- Aron, Adam R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 170-177. doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.010
- Aron, Adam R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014). Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), 177-185. doi.org/10.1016/j.tics.2013.12.003
- Au, J., Buschkuhl, M., Duncan, G. J., & Jaeggi, S. M. (2016). There is no convincing evidence that working memory training is NOT effective: A reply to Melby-Lervåg and Hulme (2015). *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(1), 331-337. doi.org/10.3758/s13423-015-0967-4
- Bailey, H. R., Dunlosky, J., & Hertzog, C. (2014). Does Strategy Training Reduce Age-Related Deficits in Working Memory? *Gerontology*, 60(4), 346-356. doi.org/10.1159/000356699
- Baltes, P. B., & Kliegl, R. (1992). Further Testing of Limits of Cognitive Plasticity: Negative Age Differences in a Mnemonic Skill Are Robust. *Developmental Psychology*, 28(1), 121-125. http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.28.1.121
- Bangert, M., & Schlaug, G. (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *European Journal of Neuroscience*, 24(6), 1832-1834. doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05031.x
- Baniqued, P. L., Allen, C. M., Kranz, M. B., Johnson, K., Sipolins, A., Dickens, C., Kramer, A. F. (2015). Working Memory, Reasoning, and Task Switching Training: Transfer Effects, Limitations, and Great Expectations? *PLOS ONE*, 10(11), e0142169. doi.org/10.1371/journal.pone.0142169
- Barkley, R. A. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological bulletin*, 121(1), 65.
- Barnea-Goraly, N., Menon, V., Eckert, M., Tamm, L., Bammer, R., Karchemskiy, A., Reiss, A. L. (2005). White Matter Development During Childhood and Adolescence: A Cross-sectional Diffusion Tensor Imaging Study. *Cerebral Cortex*, 15(12), 1848-1854. doi.org/10.1093/cercor/bhi062
- Basak, C., Boot, W. R., Voss, M. W., & Kramer, A. F. (2008). Can training in a real-time strategy video game attenuate cognitive decline in older adults? *Psychology and Aging*, 23(4), 765-777. doi.org/10.1037/a0013494

- Battro, A. M., Fischer, K. W., & Léna, P. J. (2010). *The Educated Brain: Essays in Neuroeducation*. Cambridge University Press.
- Beauchamp, K. G., Kahn, L. E., & Berkman, E. T. (2016). Does inhibitory control training transfer?: behavioral and neural effects on an untrained emotion regulation task. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11(9), 1374-1382. doi.org/10.1093/scan/nsw061
- Bell, M. A., & Fox, N. A. (1992). The Relations between Frontal Brain Electrical Activity and Cognitive Development during Infancy. *Child Development*, 63(5), 1142-1163. doi.org/10.1111/j.1467-8624.1992.tb01685.x
- Benson, J. E., Sabbagh, M. A., Carlson, S. M., & Zelazo, P. D. (2013). Individual differences in executive functioning predict preschoolers' improvement from theory-of-mind training. *Developmental Psychology*, 49(9), 1615-1627.
- Bergman-Nutley, S., & Klingberg, T. (2014). Effect of working memory training on working memory, arithmetic and following instructions. *Psychological Research*, 78(6), 869-877. doi.org/10.1007/s00426-014-0614-0
- Berkman, E. T., Kahn, L. E., & Merchant, J. S. (2014). Training-Induced Changes in Inhibitory Control Network Activity. *Journal of Neuroscience*, 34(1), 149-157. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3564-13.2014
- Bermudez, P. (2005). Differences in Gray Matter between Musicians and Nonmusicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 395-399. doi.org/10.1196/annals.1360.057
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child development*, 81(6), 1641-1660.
- Bezdjian, S., Tuvblad, C., Wang, P., Raine, A., & Baker, L. A. (2014). Motor impulsivity during childhood and adolescence: A longitudinal biometric analysis of the go/no-go task in 9- to 18-year-old twins. *Developmental Psychology*, 50(11), 2549-2557. doi.org/10.1037/a0038037
- Bherer, L., Kramer, A. F., Peterson, M. S., Colcombe, S., Erickson, K., & Bécic, E. (2008). Transfer Effects in Task-Set Cost and Dual-Task Cost After Dual-Task Training in Older and Younger Adults: Further Evidence for Cognitive Plasticity in Attentional Control in Late Adulthood. *Experimental Aging Research*, 34(3), 188-219. doi.org/10.1080/03610730802070068
- Bialystok, E. (2017). The bilingual adaptation: How minds accommodate experience. *Psychological Bulletin*, 143(3), 233-262. doi.org/10.1037/bul0000099
- Bialystok, E., & Craik, F. I. M. (2006). *Lifespan Cognition: Mechanisms of Change*. Oxford University Press.

- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child development*, 78(2), 647–663.
- Blakemore, S.-J., & Robbins, T. W. (2012). Decision-making in the adolescent brain. *Nature Neuroscience*, 15(9), 1184-1191. doi.org/10.1038/nn.3177
- Bogg, T., & Lasecki, L. (2015). Reliable gains? Evidence for substantially underpowered designs in studies of working memory training transfer to fluid intelligence. *Frontiers in Psychology*, 5(1589), 1-8. doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01589
- Boll, T., & Bryant, B. K. (Eds.). (1988). *The Master lecture series, Vol. 7. Clinical neuropsychology and brain function: Research, measurement, and practice*. Washington, DC, US: American Psychological Association.
- Boot, W. R., Simons, D. J., Stothart, C., & Stutts, C. (2013). The Pervasive Problem With Placebos in Psychology: Why Active Control Groups Are Not Sufficient to Rule Out Placebo Effects. *Perspectives on Psychological Science*, 8(4), 445-454. doi.org/10.1177/1745691613491271
- Borella, E., Carbone, E., Pastore, M., De Beni, R., & Carretti, B. (2017). Working Memory Training for Healthy Older Adults: The Role of Individual Characteristics in Explaining Short- and Long-Term Gains. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11(99), 1-21. doi.org/10.3389/fnhum.2017.00099
- Borst, G., Ahr, E., Roell, M. & Houdé, O. (2015) *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(1), 228–234. doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9
- Borst, G., Aite, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development: evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 57(2), 21-25.
- Borst, G., Cachia, A., Tissier, C., Ahr, E., Simon, G., & Houdé, O. (2016). Early Cerebral Constraints on Reading Skills in School-Age Children: An MRI Study. *Mind, Brain, and Education*, 10(1), 47-54.
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, 49(7), 1366-1374. doi.org/10.1037/a0029622
- Borst, Grégoire, Ahr, E., Roell, M., & Houdé, O. (2015). The cost of blocking the mirror generalization process in reading: evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(1), 228-234. doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9
- Borst, Gregoire, Ganis, G., Thompson, W. L., & Kosslyn, S. M. (2012). Representations in mental imagery and working memory: Evidence from different types of visual masks. *Memory & Cognition*, 40(2), 204-217. doi.org/10.3758/s13421-011-0143-7

- Borst, Grégoire, Kievit, R. A., Thompson, W. L., & Kosslyn, S. M. (2011). Mental rotation is not easily cognitively penetrable. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(1), 60-75.  
doi.org/10.1080/20445911.2011.454498
- Borst, Grégoire, Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2012). Inhibitory control in number-conservation and class-inclusion tasks: A neo-Piagetian inter-task priming study. *Cognitive Development*, 27(3), 283-298. doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.02.004
- Brault Foisy, L.-M., Ahr, E., Masson, S., Borst, G., & Houdé, O. (2015). Blocking Our Brain: How We Can Avoid Repetitive Mistakes! *Frontiers for Young Minds*, 3(17), 1-9.  
doi.org/10.3389/frym.2015.00017
- Brehmer, Y., Li, S.-C., Müller, V., von Oertzen, T., & Lindenberger, U. (2007). Memory plasticity across the life span: Uncovering children's latent potential. *Developmental Psychology*, 43(2), 465-478. doi.org/10.1037/0012-1649.43.2.465
- Brehmer, Y., Westerberg, H., & Bäckman, L. (2012). Working-memory training in younger and older adults: training gains, transfer, and maintenance. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(63), 1-7.  
doi.org/10.3389/fnhum.2012.00063
- Bull, R., & Lee, K. (2014). Executive Functioning and Mathematics Achievement. *Child Development Perspectives*, 8(1), 36-41. doi.org/10.1111/cdep.12059
- Bull, R., Espy, K. A., Wiebe, S. A., Sheffield, T. D., & Nelson, J. M. (2011). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: sources of variation in emergent mathematic achievement: Executive control and emergent mathematics. *Developmental Science*, 14(4), 679-692. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01012.x
- Buschkuehl, M., Hernandez-Garcia, L., Jaeggi, S. M., Bernard, J. A., & Jonides, J. (2014). Neural effects of short-term training on working memory. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 14(1), 147-160. doi.org/10.3758/s13415-013-0244-9
- Buschkuehl, M., Jaeggi, S. M., & Jonides, J. (2012). Neuronal effects following working memory training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(1), 167-179.
- Buschkuehl, M., Jaeggi, S., Kobel, A., and Perrig, W. J. (2008). *Braintwister – Aufgabensammlung für kognitives Training*. Bern: Institut für Psychologie, Universität Bern.
- Button, K. S., Ioannidis, J. P., Mokrysz, C., Nosek, B. A., Flint, J., Robinson, E. S., et al. (2013). Power failure: why small sample size undermines the reliability of neuroscience. *Nature Review Neuroscience*, 14(5), 365-376.
- Cachia, A., Borst, G., Tissier, C., Fisher, C., Plaze, M., Gay, O., Raznahan, A. (2016). Longitudinal stability of the folding pattern of the anterior cingulate cortex during development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 19, 122-127. doi.org/10.1016/j.dcn.2016.02.011

- Cachia, Arnaud, Borst, G., Vidal, J., Fischer, C., Pineau, A., Mangin, J.-F., & Houdé, O. (2014). The Shape of the ACC Contributes to Cognitive Control Efficiency in Preschoolers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(1), 96-106. doi.org/10.1162/jocn\_a\_00459
- Carlson, S. M., & Moses, L. J. (2001). Individual differences in inhibitory control and children's theory of mind. *Child development*, 72(4), 1032-1053.
- Carpenter, M., Nagell, K., Tomasello, M., Butterworth, G., & Moore, C. (1998). Social Cognition, Joint Attention, and Communicative Competence from 9 to 15 Months of Age. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 63(4). doi.org/10.2307/1166214
- Case, R. (1987). Neo-Piagetian Theory: Retrospect and Prospect. *International Journal of Psychology*, 22(5-6), 773-791. doi.org/10.1080/00207598708246802
- Casey, B. J., & Caudle, K. (2013). The teenage brain: Self control. *Current directions in psychological science*, 22(2), 82-87.
- Cassotti, M., Agogue, M., Camarda, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving and Idea Generation from Childhood to Adulthood. *New Directions in Child & Adolescent Development*, 2016(151), 61-72.
- Cassotti, M., Aite, A., Osmont, A., Houdé, O., & Borst, G. (2014). What have we learned about the processes involved in the Iowa Gambling Task from developmental studies? *Frontiers in Psychology*, 5, 915.
- Cepeda, N. J., Kramer, A. F., & Gonzalez de Sather, J. C. M. (2001). Changes in executive control across the life span: Examination of task-switching performance. *Developmental Psychology*, 37(5), 715-730. doi.org/10.1037//0012-1649.37.5.715
- Chavan, C. F., Mouthon, M., Draganski, B., van der Zwaag, W., & Spierer, L. (2015). Differential patterns of functional and structural plasticity within and between inferior frontal gyri support training-induced improvements in inhibitory control proficiency: Training-Induced Plasticity in Inhibitory Control. *Human Brain Mapping*, 36(7), 2527-2543. doi.org/10.1002/hbm.22789
- Chavan, C., Mouthon, M., Simonet, M., Hoogewoud, H.-M., Draganski, B., van der Zwaag, W., & Spierer, L. (2017). Sustained enhancements in inhibitory control depend primarily on the reinforcement of fronto-basal anatomical connectivity. *Brain Structure and Function*, 222(1), 635-643. doi.org/10.1007/s00429-015-1156-y
- Chein, J. M., & Morrison, A. B. (2010). Expanding the mind's workspace: Training and transfer effects with a complex working memory span task. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(2), 193-199. doi.org/10.3758/PBR.17.2.193
- Chenn, A., & Walsh, C. A. (2002). Regulation of cerebral cortical size by control of cell cycle exit in neural precursors. *Science*, 297(5580), 365-369.

- Chooi, W.-T., & Thompson, L. A. (2012). Working memory training does not improve intelligence in healthy young adults. *Intelligence*, 40(6), 531-542. doi.org/10.1016/j.intell.2012.07.004
- Chooi, W.-T., & Thompson, L. A. (2012). Working memory training does not improve intelligence in healthy young adults. *Intelligence*, 40(6), 531-542. doi.org/10.1016/j.intell.2012.07.004
- Choudhury, S. (2010). Culturing the adolescent brain: what can neuroscience learn from anthropology? *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 5(2-3), 159-167. doi.org/10.1093/scan/nsp030
- Chugani, H. T., Phelps, M. E., & Mazziotta, J. C. (1987). Positron emission tomography study of human brain functional development. *Annals of Neurology*, 22(4), 487-497. doi.org/10.1002/ana.410220408
- Ciesielski, K. T., Lesnik, P. G., Savoy, R. L., Grant, E. P., & Ahlfors, S. P. (2006). Developmental neural networks in children performing a Categorical N-Back Task. *NeuroImage*, 33(3), 980-990. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.07.028
- Cieslik, E. C., Mueller, V. I., Eickhoff, C. R., Langner, R., & Eickhoff, S. B. (2015). Three key regions for supervisory attentional control: Evidence from neuroimaging meta-analyses. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 48, 22-34. doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.11.003
- Colcombe, S., & Kramer, A. F. (2003). Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults: A Meta-Analytic Study. *Psychological Science*, 14(2), 125-130. doi.org/10.1111/1467-9280.t01-1-01430
- Collette, F., Hogge, M., Salmon, E., & Van der Linden, M. (2006). Exploration of the neural substrates of executive functioning by functional neuroimaging. *Neuroscience*, 139(1), 209-221. doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.05.035
- Cowan, W. M., Fawcett, J. W., O'Leary, D. D., & Stanfield, B. B. (1984). Regressive events in neurogenesis. *Science (New York, N.Y.)*, 225(4668), 1258-1265.
- Cragg, L., & Gilmore, C. (2014). Skills underlying mathematics: The role of executive function in the development of mathematics proficiency. *Trends in Neuroscience and Education*, 3(2), 63-68. doi.org/10.1016/j.tine.2013.12.001
- Criaud, M., & Boulinguez, P. (2013). Have we been asking the right questions when assessing response inhibition in go/no-go tasks with fMRI? A meta-analysis and critical review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(1), 11-23. doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.11.003
- Crone, E. A., & Steinbeis, N. (2017). Neural Perspectives on Cognitive Control Development during Childhood and Adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(3), 205-215. doi.org/10.1016/j.tics.2017.01.003

- Dahlin, K. I. E. (2011). Effects of working memory training on reading in children with special needs. *Reading and Writing*, 24(4), 479-491. doi.org/10.1007/s11145-010-9238-y
- Dahlin, K. I. E. (2013). Working Memory Training and the Effect on Mathematical Achievement in Children with Attention Deficits and Special Needs. *Journal of Education and Learning*, 2(1). doi.org/10.5539/jel.v2n1p118
- Dale, A. M., & Sereno, M. I. (1993). Improved Localization of Cortical Activity by Combining EEG and MEG with MRI Cortical Surface Reconstruction: A Linear Approach. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(2), 162-176. doi.org/10.1162/jocn.1993.5.2.162
- Dale, A. M., Fischl, B., & Sereno, M. I. (1999). Cortical Surface-Based Analysis: I. Segmentation and Surface Reconstruction. *NeuroImage*, 9(2), 179-194. doi.org/10.1006/nimg.1998.0395
- Daucourt, M. C., Schatschneider, C., Connor, C. M., Al Otaiba, S., & Hart, S. A. (2018). Inhibition, Updating Working Memory, and Shifting Predict Reading Disability Symptoms in a Hybrid Model: Project KIDS. *Frontiers in Psychology*, 9(238), 1-16. doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00238
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, 44(11), 2037-2078. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56(2), 384-398. doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 254-262. doi.org/10.1016/j.tics.2011.04.003
- Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., & Cohen, L. (2010). Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage*, 49(2), 1837-1848. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.09.024
- Dekker, M. C., Ziermans, T. B., Spruijt, A. M., & Swaab, H. (2017). Cognitive, Parent and Teacher Rating Measures of Executive Functioning: Shared and Unique Influences on School Achievement. *Frontiers in Psychology*, 8(48), 1-13. doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00048
- Demakis, G. J. (2003). A meta-analytic review of the sensitivity of the Wisconsin Card Sorting Test to frontal and lateralized frontal brain damage. *Neuropsychology*, 17(2), 255-264. doi.org/10.1037/0894-4105.17.2.255
- Demetriou, A., Christou, C., Spanoudis, G., & Platsidou, M. (2002). I. Introduction. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 67(1), 1-38. doi.org/10.1111/1540-5834.671174
- Dempster, F. N., & Corkill, A. J. (1999). Individual differences in susceptibility to interference and general cognitive ability. *Acta Psychologica*, 101(2-3), 395-416.

- Denney, N. W. (1984). A model of cognitive development across the life span. *Developmental Review*, 4(2), 171-191.
- Desikan, R. S., Ségonne, F., Fischl, B., Quinn, B. T., Dickerson, B. C., Blacker, D., Killiany, R. J. (2006). An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest. *NeuroImage*, 31(3), 968-980.  
doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.01.021
- Destrieux, C., Fischl, B., Dale, A., & Halgren, E. (2010). Automatic parcellation of human cortical gyri and sulci using standard anatomical nomenclature. *NeuroImage*, 53(1), 1-15.  
doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.010
- Diamond, A. (2012). Activities and Programs That Improve Children’s Executive Functions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(5), 335-341. doi.org/10.1177/0963721412453722
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168.  
doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750
- 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., & Lee, K. (2011). Interventions Shown to Aid Executive Function Development in Children 4 to 12 Years Old. *Science*, 333(6045), 959-964. doi.org/10.1126/science.1204529
- 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. doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool program improves cognitive control. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5855), 1387-1388. doi.org/10.1126/science.1151148
- Diamond, A., Towle, C., & Boyer, K. (1994). Young children’s performance on a task sensitive to the memory functions of the medial temporal lobe in adults: The delayed nonmatching-to-sample task reveals problems that are due to non-memory-related task demands. *Behavioral Neuroscience*, 108(4), 659.
- Diamond, Adele, & Kirkham, N. (2005). Not Quite as Grown-Up as We Like to Think: Parallels Between Cognition in Childhood and Adulthood. *Psychological Science*, 16(4), 291-297.  
doi.org/10.1111/j.0956-7976.2005.01530.x
- Dosenbach, N. U., Fair, D. A., Cohen, A. L., Schlaggar, B. L., & Petersen, S. E. (2008). A dual-networks architecture of top-down control. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(3), 99-105.
- Dougherty, M. R., Hamovitz, T., & Tidwell, J. W. (2016). Reevaluating the effectiveness of n-back training on transfer through the Bayesian lens: Support for the null. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(1), 306-316. doi.org/10.3758/s13423-015-0865-9

- Dowsett, S. M., & Livesey, D. J. (2000). The development of inhibitory control in preschool children: Effects of “executive skills” training. *Developmental Psychobiology*, 36(2), 161-174.  
doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(200003)36:2<161::AID-DEV7>3.0.CO;2-0
- Draganski, B., Gaser, C., Kempermann, G., Kuhn, H. G., Winkler, J., Buchel, C., & May, A. (2006). Temporal and Spatial Dynamics of Brain Structure Changes during Extensive Learning. *Journal of Neuroscience*, 26(23), 6314-6317. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4628-05.2006
- Draganski, Bogdan, Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427(6972), 311.
- Duncan Roger Johnson Michaela Swale, J. (1997). Frontal Lobe Deficits after Head Injury: Unity and Diversity of Function. *Cognitive Neuropsychology*, 14(5), 713-741.  
doi.org/10.1080/026432997381420
- Duncan, J., & Owen, A. M. (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends Neurosci.*, 23, 475–483.
- Duncan, J., & Owen, A. M. (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends in Neurosciences*, 23(10), 475-483. doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01633-7
- Dunning, D. L., & Holmes, J. (2014). Does working memory training promote the use of strategies on untrained working memory tasks? *Memory & Cognition*, 42(6), 854-862.  
doi.org/10.3758/s13421-014-0410-5
- Dye, M. W. G., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009). Increasing Speed of Processing With Action Video Games. *Current Directions in Psychological Science*, 18(6), 321-326. doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01660.x
- Dye, M. W. G., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009). Increasing Speed of Processing With Action Video Games. *Current Directions in Psychological Science*, 18(6), 321-326.  
https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01660.x
- Eickhoff, S., Walters, N. B., Schleicher, A., Kril, J., Egan, G. F., Zilles, K., et al. (2005). High-resolution MRI reflects myeloarchitecture and cytoarchitecture of human cerebral cortex. *Human Brain Mapping*, 24(3), 206-215.
- Eigsti, I.-M., Zayas, V., Mischel, W., Shoda, Y., Ayduk, O., Dadlani, M. B., Casey, B. J. (2006). Predicting cognitive control from preschool to late adolescence and young adulthood. *Psychological science*, 17(6), 478–484.
- Elkind, D. (1961). Children’s Discovery of the Conservation of Mass, Weight, and Volume: Piaget Replication Study II. *The Journal of Genetic Psychology*, 98(2), 219-227.  
doi.org/10.1080/00221325.1961.10534372

- Enge, S., Behnke, A., Fleischhauer, M., Küttler, L., Kliegel, M., & Strobel, A. (2014). No evidence for true training and transfer effects after inhibitory control training in young healthy adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(4), 987-1001. doi.org/10.1037/a0036165
- Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2013). Boosting brain functions: Improving executive functions with behavioral training, neurostimulation, and neurofeedback. *International Journal of Psychophysiology*, 88(1), 1-16. doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.02.001
- Epley, N., Morewedge, C. K., & Keysar, B. (2004). Perspective taking in children and adults: Equivalent egocentrism but differential correction. *Journal of Experimental Social Psychology*, 40(6), 760-768. doi.org/10.1016/j.jesp.2004.02.002
- Erickson, K. I., Boot, W. R., Basak, C., Neider, M. B., Prakash, R. S., Voss, M. W., ... Kramer, A. F. (2010). Striatal Volume Predicts Level of Video Game Skill Acquisition. *Cerebral Cortex*, 20(11), 2522-2530. doi.org/10.1093/cercor/bhp293
- Eslinger, P. J., & Grattan, L. M. (1993). Frontal lobe and frontal-striatal substrates for different forms of human cognitive flexibility. *Neuropsychologia*, 31(1), 17-28. doi.org/10.1016/0028-3932(93)90077-D
- Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A., & Senn, T. E. (2004). The contribution of executive functions to emergent mathematic skills in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 26(1), 465-486.
- Evans, J. S. B. (1972). Reasoning with negatives. *British Journal of Psychology*, 63(2), 213-219.
- Evans, J. S. B. T. (1989). *Bias in human reasoning: Causes and consequences*. Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Evans, J. S. B. T., & Over, D. (1996). *Rationality and reasoning*. Hove: Psychology Press.
- Evans, J., & Frankish, K. *In two minds: Dual processes and beyond*. (2009). New York, NY, US: Oxford University Press. doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199230167.001.0001
- Eysenck, M. W., & Calvo, M. G. (1992). Anxiety and Performance: The Processing Efficiency Theory. *Cognition and Emotion*, 6(6), 409-434. doi.org/10.1080/02699939208409696
- Fischl, B. (2004). Automatically Parcellating the Human Cerebral Cortex. *Cerebral Cortex*, 14(1), 11-22. doi.org/10.1093/cercor/bhg087
- Fischl, B., & Dale, A. M. (2000). Measuring the thickness of the human cerebral cortex from magnetic resonance images. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(20), 11050-11055. doi.org/10.1073/pnas.200033797

- Fischl, B., Liu, A., & Dale, A. M. (2001). Automated manifold surgery: constructing geometrically accurate and topologically correct models of the human cerebral cortex. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 20(1), 70-80. doi.org/10.1109/42.906426
- Fischl, B., Salat, D. H., Busa, E., Albert, M., Dieterich, M., Haselgrove, C., Dale, A. M. (2002). Whole Brain Segmentation. *Neuron*, 33(3), 341-355. doi.org/10.1016/S0896-6273(02)00569-X
- Fischl, B., Salat, D. H., van der Kouwe, A. J. W., Makris, N., Ségonne, F., Quinn, B. T., & Dale, A. M. (2004). Sequence-independent segmentation of magnetic resonance images. *NeuroImage*, 23, S69-S84. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.07.016
- Fischl, B., Sereno, M. I., & Dale, A. M. (1999). Cortical surface-based analysis: II: inflation, flattening, and a surface-based coordinate system. *Neuroimage*, 9(2), 195-207.
- Fischl, B., Sereno, M. I., Tootell, R. B. H., & Dale, A. M. (1999). High-resolution intersubject averaging and a coordinate system for the cortical surface. *Human Brain Mapping*, 8(4), 272-284. doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1999)8:4<272::AID-HBM10>3.0.CO;2-4
- Fischl, B., Sereno, M. I., Tootell, R. B., & Dale, A. M. (1999). High-resolution intersubject averaging and a coordinate system for the cortical surface. *Human Brain Mapping*, 8(4), 272-284.
- Fischl, B., van der Kouwe, A., Destrieux, C., Halgren, E., Segonne, F., Salat, D. H., et al. (2004). Automatically parcellating the human cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 14(1), 11-22.
- Fjell, A. M., Walhovd, K. B., Brown, T. T., Kuperman, J. M., Chung, Y., Hagler, D. J., Gruen, J. (2012). Multimodal imaging of the self-regulating developing brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(48), 19620-19625. doi.org/10.1073/pnas.1208243109
- Fornito, A., Yücel, M., Wood, S. J., Proffitt, T., McGorry, P. D., Velakoulis, D., & Pantelis, C. (2006). Morphology of the paracingulate sulcus and executive cognition in schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 88(1-3), 192-197. doi.org/10.1016/j.schres.2006.06.034
- Fornito, A., Yücel, M., Wood, S., Stuart, G. W., Buchanan, J.-A., Proffitt, T., Pantelis, C. (2004). Individual Differences in Anterior Cingulate/Paracingulate Morphology Are Related to Executive Functions in Healthy Males. *Cerebral Cortex*, 14(4), 424-431. doi.org/10.1093/cercor/bhh004
- Foroughi, C. K., Monfort, S. S., Paczynski, M., McKnight, P. E., & Greenwood, P. M. (2016). Placebo effects in cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201601243. doi.org/10.1073/pnas.1601243113
- Foster, J. L., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Draheim, C., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2017). Do the effects of working memory training depend on baseline ability level? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43(11), 1677-1689. doi.org/10.1037/xlm0000426

- 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.org/10.1037/0096-3445.137.2.201
- Fuhs, M. W., & Day, J. D. (2011). Verbal ability and executive functioning development in preschoolers at head start. *Developmental Psychology*, 47(2), 404-416. doi.org/10.1037/a0021065
- Gaab, N., & Schlaug, G. (2003). Musicians Differ from Nonmusicians in Brain Activation despite Performance Matching. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999(1), 385-388. doi.org/10.1196/annals.1284.048
- Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2012). Training-Induced Improvement of Response Selection and Error Detection in Aging Assessed by Task Switching: Effects of Cognitive, Physical, and Relaxation Training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(130), 1-18. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00130
- Gao, W., Lin, W., Chen, Y., Gerig, G., Smith, J. K., Jewells, V., & Gilmore, J. H. (2009). Temporal and Spatial Development of Axonal Maturation and Myelination of White Matter in the Developing Brain. *American Journal of Neuroradiology*, 30(2), 290-296. doi.org/10.3174/ajnr.A1363
- Garavan, H., Hester, R., Murphy, K., Fassbender, C., & Kelly, C. (2006). Individual differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control. *Brain Research*, 1105(1), 130-142. doi.org/10.1016/j.brainres.2006.03.029
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003a). Brain Structures Differ between Musicians and Non-Musicians. *The Journal of Neuroscience*, 23(27), 9240-9245. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-27-09240.2003
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003c). Gray Matter Differences between Musicians and Nonmusicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999(1), 514-517. doi.org/10.1196/annals.1284.062
- Ghosh, S. S., Kakunoori, S., Augustinack, J., Nieto-Castanon, A., Kovelman, I., Gaab, N., et al. (2010). Evaluating the validity of volume-based and surface-based brain image registration for developmental cognitive neuroscience studies in children 4 to 11 years of age. *Neuroimage*, 53(1), 85-93.
- Giedd, J. N., & Rapoport, J. L. (2010). Structural MRI of pediatric brain development: what have we learned and where are we going? *Neuron*, 67(5), 728-734.
- Gilmore, C., Attridge, N., Clayton, S., Cragg, L., Johnson, S., Marlow, N., et al. (2013). Individual differences in inhibitory control, not non-verbal number acuity, correlate with mathematics achievement. *PLoS One*, 8(6), e67374.

- Gilmore, J. H., Knickmeyer, R. C., & Gao, W. (2018). Imaging structural and functional brain development in early childhood. *Nature Reviews Neuroscience*, 19(3), 123-137. doi.org/10.1038/nrn.2018.1
- Gioia, G. A., Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. (2000). TEST REVIEW Behavior Rating Inventory of Executive Function. *Child Neuropsychology*, 6(3), 235-238. doi.org/10.1076/chin.6.3.235.3152
- Girard, N., Raybaud, C., & Du, P. L. (1991). MRI study of brain myelination. *Journal of Neuroradiology. Journal de Neuroradiologie*, 18(4), 291-307.
- Giroux, J., & Ste-Marie, A. (2001). The solution of compare problems among first-grade students. *European Journal of Psychology of Education*, 16(2), 141-161. doi.org/10.1007/BF03173022
- Gogtay, N., & Thompson, P. M. (2010). Mapping gray matter development: Implications for typical development and vulnerability to psychopathology. *Brain and Cognition*, 72(1), 6-15. doi.org/10.1016/j.bandc.2009.08.009
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Toga, A. W. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8174-8179.
- Goldman-Rakic, P. S. (2011). Circuitry of Primate Prefrontal Cortex and Regulation of Behavior by Representational Memory. In *Comprehensive Physiology* (p. 373-417). American Cancer Society. doi.org/10.1002/cphy.cp010509
- Golestani, N., Paus, T., & Zatorre, R. J. (2002). Anatomical Correlates of Learning Novel Speech Sounds. *Neuron*, 35(5), 997-1010. doi.org/10.1016/S0896-6273(02)00862-0
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Exercising your brain: A review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychology and Aging*, 23(4), 692-701. doi.org/10.1037/a0014345
- Gruber, A. J., Dayan, P., Gutkin, B. S., & Solla, S. A. (2006). Dopamine modulation in the basal ganglia locks the gate to working memory. *Journal of Computational Neuroscience*, 20(2), 153-166. doi.org/10.1007/s10827-005-5705-x
- Guerra-Carrillo, B., Katovich, K., & Bunge, S. A. (2016). Does higher education hone cognitive functioning and learning efficacy? Findings from a large, representative sample. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.4232993.v1>
- Haier, R. J., Karama, S., Leyba, L., & Jung, R. E. (2009). MRI assessment of cortical thickness and functional activity changes in adolescent girls following three months of practice on a visual-spatial task. *BMC Research Notes*, 2(1), 174. doi.org/10.1186/1756-0500-2-174
- Halford, G. S., & Fullerton, T. J. (1970). A Discrimination Task Which Induces Conservation of Number. *Child Development*, 41(1), 205. doi.org/10.2307/1127400

- Han, S., & Northoff, G. (2008). Culture-sensitive neural substrates of human cognition: a transcultural neuroimaging approach. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(8), 646-654.  
[doi.org/10.1038/nrn2456](https://doi.org/10.1038/nrn2456)
- Han, X., Jovicich, J., Salat, D., van der Kouwe, A., Quinn, B., Czanner, S., Fischl, B. (2006). Reliability of MRI-derived measurements of human cerebral cortical thickness: The effects of field strength, scanner upgrade and manufacturer. *NeuroImage*, 32(1), 180-194.  
[doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.02.051](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.02.051)
- Harnishfeger, K. K., & Bjorklund, D. F. (1994). A developmental perspective on individual differences in inhibition. *Learning and Individual Differences*, 6(3), 331-355. [doi.org/10.1016/1041-6080\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/1041-6080(94)90021-3)
- Harrison, T. L., Shipstead, Z., Hicks, K. L., Hambrick, D. Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2013). Working Memory Training May Increase Working Memory Capacity but Not Fluid Intelligence. *Psychological Science*, 24(12), 2409-2419. [doi.org/10.1177/0956797613492984](https://doi.org/10.1177/0956797613492984)
- Harrison, T. L., Shipstead, Z., Hicks, K. L., Hambrick, D. Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2013). Working Memory Training May Increase Working Memory Capacity but Not Fluid Intelligence. *Psychological Science*, 24(12), 2409-2419. <https://doi.org/10.1177/0956797613492984>
- Hartmann, L., Sallard, E., & Spierer, L. (2016). Enhancing frontal top-down inhibitory control with Go/NoGo training. *Brain Structure and Function*, 221(7), 3835-3842. [doi.org/10.1007/s00429-015-1131-7](https://doi.org/10.1007/s00429-015-1131-7)
- Hauser, M. D., Tsao, F., Garcia, P., & Spelke, E. S. (2003). Evolutionary foundations of number: spontaneous representation of numerical magnitudes by cotton-top tamarins. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 270(1523), 1441-1446.
- Hertzog, C., Kramer, A. F., Wilson, R. S., & Lindenberger, U. (2008). Enrichment effects on adult cognitive development: can the functional capacity of older adults be preserved and enhanced? *Psychological science in the public interest*, 9(1), 1-65.
- Heyder, K., Suchan, B., & Daum, I. (2004). Cortico-subcortical contributions to executive control. *Acta Psychologica*, 115(2-3), 271-289. [doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.12.010](https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.12.010)
- Holmes, J., Gathercole, S. E., Place, M., Dunning, D. L., Hilton, K. A., & Elliott, J. G. (2010). Working memory deficits can be overcome: Impacts of training and medication on working memory in children with ADHD. *Applied Cognitive Psychology*, 24(6), 827-836. [doi.org/10.1002/acp.1589](https://doi.org/10.1002/acp.1589)
- Homer, B. D., Plass, J. L., Raffaele, C., Ober, T. M., & Ali, A. (2018). Improving high school students' executive functions through digital game play. *Computers & Education*, 117, 50-58.  
[doi.org/10.1016/j.compedu.2017.09.011](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.09.011)

- Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development: object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15(1), 63-73. doi.org/10.1016/S0885-2014(00)00015-0
- Houdé, O. (2007). First insights on “neuropedagogy of reasoning”. *Thinking & Reasoning*, 13(2), 81-89. doi.org/10.1080/13546780500450599
- Houdé, O. (2015). *La psychologie de l'enfant: « Que sais-je ? »* n° 369. Presses Universitaires de France.
- Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(148), 1-5. doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget’s conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110(3), 332-346. doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008
- Houdé, O., Rossi, S., Lubin, A., & Joliot, M. (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: an fMRI meta-analysis of 52 studies including 842 children. *Developmental Science*, 13(6), 876-885.
- Hu, M., Wang, X., Zhang, W., Hu, X., & Chen, A. (2017). Neural interactions mediating conflict control and its training-induced plasticity. *Neuroimage*, 163, 390-397.
- Hudspeth, W. J., & Pribram, K. H. (1990). Stages of Brain and Cognitive Maturation. *Journal of Educational Psychology*, 82(4), 881-884.
- Huijbregts, S. C. J., Warren, A. J., de Sonneville, L. M. J., & Swaab-Barneveld, H. (2008). Hot and Cool Forms of Inhibitory Control and Externalizing Behavior in Children of Mothers who Smoked during Pregnancy: An Exploratory Study. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 36(3), 323-333. doi.org/10.1007/s10802-007-9180-x
- Huizinga, M., Baeyens, D., & Burack, J. A. (2018). Editorial: Executive Function and Education. *Frontiers in Psychology*, 9. doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01357
- Huttenlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia*, 28(6), 517-527.
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., & Schlaug, G. (2009). Musical Training Shapes Structural Brain Development. *Journal of Neuroscience*, 29(10), 3019-3025. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009
- Inhelder, B., & Piaget, J. (1959). *La Genèse des Structures Logiques Élémentaires Classifications Et Sériations*. Delachaux & Niestlé.
- Iversen, S. D., & Mishkin, M. (1970). Perseverative interference in monkeys following selective lesions of the inferior prefrontal convexity. *Experimental Brain Research*, 11(4), 376-386.

- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(19), 6829-6833. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(19), 6829-6833. [doi.org/10.1073/pnas.0801268105](https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105)
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Shah, P. (2011). Short- and long-term benefits of cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25), 10081-10086. [doi.org/10.1073/pnas.1103228108](https://doi.org/10.1073/pnas.1103228108)
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Shah, P., & Jonides, J. (2014). The role of individual differences in cognitive training and transfer. *Memory & Cognition*, 42(3), 464-480. [doi.org/10.3758/s13421-013-0364-z](https://doi.org/10.3758/s13421-013-0364-z)
- Jaeggi, Susanne M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(19), 6829–6833.
- Jaušovec, N., & Jaušovec, K. (2012). Working memory training: Improving intelligence – Changing brain activity. *Brain and Cognition*, 79(2), 96-106. [doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.007](https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.007)
- Jaušovec, N., & Jaušovec, K. (2012). Working memory training: Improving intelligence – Changing brain activity. *Brain and Cognition*, 79(2), 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.007>
- Johann, V. E., & Karbach, J. (2018). Validation of new online game-based executive function tasks for children. *Journal of Experimental Child Psychology*. [doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.009](https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.009)
- Johnson, M. H. (1995). The inhibition of automatic saccades in early infancy. *Developmental Psychobiology: The Journal of the International Society for Developmental Psychobiology*, 28(5), 281–291.
- Jolles, D. D., & Crone, E. A. (2012). Training the developing brain: a neurocognitive perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*. 6(76), 1-13. [doi.org/10.3389/fnhum.2012.00076](https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00076)
- Jolles, D. D., Grol, M. J., Van Buchem, M. A., Rombouts, S. A. R. B., & Crone, E. A. (2010). Practice effects in the brain: Changes in cerebral activation after working memory practice depend on task demands. *NeuroImage*, 52(2), 658-668. [doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.04.028](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.04.028)
- Jonides, J. (2004). How does practice makes perfect? *Nature Neuroscience*, 7(1), 10-11. [doi.org/10.1038/nn0104-10](https://doi.org/10.1038/nn0104-10)
- Jovicich, J., Czanner, S., Greve, D., Haley, E., van der Kouwe, A., Gollub, R., Dale, A. (2006). Reliability in multi-site structural MRI studies: Effects of gradient non-linearity correction on phantom and human data. *NeuroImage*, 30(2), 436-443. [doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.09.046](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.09.046)

- Karbach, J., & Kray, J. (2009). How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training: Transfer of task-switching training. *Developmental Science*, 12(6), 978-990. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00846.x
- Karbach, J., & Schubert, T. (2013). Training-induced cognitive and neural plasticity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(48), 1-2. doi.org/10.3389/fnhum.2013.00048
- Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, 5(390), 1-14. doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00390
- Karbach, J., and Brieber, S. (2010). "Neuronale Korrelate exekutiven Kontrolltrainings," in *Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*, Eds F. Petermann and U. Koglin (Lengerich: Pabst), 135.
- Karbach, J., Könen, T., & Spengler, M. (2017). Who Benefits the Most? Individual Differences in the Transfer of Executive Control Training Across the Lifespan. *Journal of Cognitive Enhancement*, 1(4), 394-405. doi.org/10.1007/s41465-017-0054-z
- Karmiloff-Smith, A. (2009). Nativism versus neuroconstructivism: Rethinking the study of developmental disorders. *Developmental Psychology*, 45(1), 56-63. doi.org/10.1037/a0014506
- Katz, H., & Beilin, H. (1976). A Test of Bryant's Claims concerning the Young Child's Understanding of Quantitative Invariance. *Child Development*, 47(3), 877. doi.org/10.2307/1128212
- Keshavan, M. S., Kennedy, J. L., & Murray, R. M. (2004). *Neurodevelopment and Schizophrenia*. Cambridge University Press.
- Kharitonova, M., Martin, R. E., Gabrieli, J. D., & Sheridan, M. A. (2013). Cortical gray-matter thinning is associated with age-related improvements on executive function tasks. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 6, 61-71.
- Kim, K., Carp, J., Fitzgerald, K. D., Taylor, S. F., & Weissman, D. H. (2013). Neural Congruency Effects in the Multi-Source Interference Task Vanish in Healthy Youth after Controlling for Conditional Differences in Mean RT. *PLoS ONE*, 8(4), e60710. doi.org/10.1371/journal.pone.0060710
- Kim, S., Nordling, J. K., Yoon, J. E., Boldt, L. J., & Kochanska, G. (2013). Effortful control in "hot" and "cool" tasks differentially predicts children's behavior problems and academic performance. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 41(1), 43-56.
- Kliegel, M., & Bürki, C. (2012). Memory training interventions require a tailor-made approach: Commentary on McDaniel and Bugg. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 1(1), 58-60. doi.org/10.1016/j.jarmac.2012.01.002
- Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(7), 317-324. doi.org/10.1016/j.tics.2010.05.002

- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Westerberg, H. (2005). Computerized Training of Working Memory in Children With ADHD-A Randomized, Controlled Trial. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177-186. <https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010>
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Westerberg, H. (2005). Computerized training of working memory in children with ADHD--a randomized, controlled trial. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177-186. [doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010](https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010)
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Westerberg, H. (2005). Computerized Training of Working Memory in Children With ADHD-A Randomized, Controlled Trial. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177-186. [doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010](https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010)
- Klingberg, T., Forssberg, H., & Westerberg, H. (2002). Increased brain activity in frontal and parietal cortex underlies the development of visuospatial working memory capacity during childhood. *Journal of cognitive neuroscience*, 14(1), 1-10.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Ganis, G. (2006). *The Case for Mental Imagery*. New York: Oxford University Press.
- Krain, A. L., Wilson, A. M., Arbuckle, R., Castellanos, F. X., & Milham, M. P. (2006). Distinct neural mechanisms of risk and ambiguity: A meta-analysis of decision-making. *NeuroImage*, 32(1), 477-484. [doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.02.047](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.02.047)
- Kray, J., & Ferdinand, N. K. (2013). How to Improve Cognitive Control in Development During Childhood: Potentials and Limits of Cognitive Interventions. *Child Development Perspectives*, 7(2), 121-125. [doi.org/10.1111/cdep.12027](https://doi.org/10.1111/cdep.12027)
- Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult Age Differences in Task Switching. *Psychology and Aging*, 15(1), 126-147.
- Kray, J., Eber, J., & Karbach, J. (2008). Verbal self-instructions in task switching: a compensatory tool for action-control deficits in childhood and old age? *Developmental Science*, 11(2), 223-236. [doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00673.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00673.x)
- Kray, J., Karbach, J., Haenig, S., & Freitag, C. (2012). Can Task-Switching Training Enhance Executive Control Functioning in Children with Attention Deficit/-Hyperactivity Disorder? *Frontiers in Human Neuroscience*, 5(180), 1-9. [doi.org/10.3389/fnhum.2011.00180](https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00180)
- Kuperberg, G. R., Broome, M. R., McGuire, P. K., David, A. S., Eddy, M., Ozawa, F., Williams, S. C. R. (2003). Regionally Localized Thinning of the Cerebral Cortex in Schizophrenia. *ARCH GEN PSYCHIATRY*, 60, 11.

- Lanoë, C., Lubin, A., Houdé, O., Borst, G., & De Neys, W. (2017). GRAMMATICAL ATTRACTION ERROR DETECTION IN CHILDREN AND ADOLESCENTS. *Cognitive Development*, 44, 127-138. doi.org/10.1016/j.cogdev.2017.09.002
- Lanoë, C., Vidal, J., Lubin, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory control is needed to overcome written verb inflection errors: Evidence from a developmental negative priming study. *Cognitive Development*, 37, 18-27. doi.org/10.1016/j.cogdev.2015.10.005
- Lappin, J. S., & Eriksen, C. W. (1966). Use of a delayed signal to stop a visual reaction-time response. *Journal of Experimental Psychology*, 72(6), 805.
- 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.
- Lehtonen, M., Soveri, A., Laine, A., Järvenpää, J., de Bruin, A., & Antfolk, J. (2018). Is bilingualism associated with enhanced executive functioning in adults? A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 144(4), 394-425. doi.org/10.1037/bul0000142
- Lemaire, C., Moran, G. R., & Swan, H. (2009). Impact of audio/visual systems on pediatric sedation in magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 30(3), 649-655.
- Lenroot, R. K., Gogtay, N., Greenstein, D. K., Wells, E. M., Wallace, G. L., Clasen, L. S., Giedd, J. N. (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. *NeuroImage*, 36(4), 1065-1073. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.053
- Levitt, P. (2003). Structural and functional maturation of the developing primate brain. *The Journal of Pediatrics*, 143(4), 35-45. doi.org/10.1067/S0022-3476(03)00400-1
- Levy, B. J., & Wagner, A. D. (2011). Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating: Cognitive control and right ventrolateral PFC. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 40-62. doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.05958.x
- Li, S.-C., Schmiedek, F., Huxhold, O., Röcke, C., Smith, J., & Lindenberger, U. (2008). Working memory plasticity in old age: Practice gain, transfer, and maintenance. *Psychology and Aging*, 23(4), 731-742. doi.org/10.1037/a0014343
- Liang, J., Matheson, B. E., Kaye, W. H., & Boutelle, K. N. (2014). Neurocognitive correlates of obesity and obesity-related behaviors in children and adolescents. *International Journal of Obesity*, 38(4), 494-506. doi.org/10.1038/ijo.2013.142
- Lindenberger, U., Kliegl, R., & Baltes, P. B. (1992). Professional expertise does not eliminate age differences in imagery-based memory performance during adulthood. *Psychology and Aging*, 7(4), 585-593.

- Liu, Q., Zhu, X., Ziegler, A., & Shi, J. (2015). The effects of inhibitory control training for preschoolers on reasoning ability and neural activity. *Scientific Reports*, 5, 14200. doi.org/10.1038/srep14200
- Locke, H. S., & Braver, T. S. (2008). Motivational influences on cognitive control: Behavior, brain activation, and individual differences. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 8(1), 99-112. doi.org/10.3758/CABN.8.1.99
- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A users' guide to the stop signal paradigm. In *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (p. 189-239). San Diego, CA, US: Academic Press.
- Logan, G. D., Cowan, W. B., & Davis, K. A. (1984). On the ability to inhibit simple and choice reaction time responses: a model and a method. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10(2), 276.
- Logan, G. D., Schachar, R. J., & Tannock, R. (1997). Impulsivity and inhibitory control. *Psychological science*, 8(1), 60-64.
- Loosli, S. V., Buschkuhl, M., Perrig, W. J., & Jaeggi, S. M. (2012). Working memory training improves reading processes in typically developing children. *Child Neuropsychology*, 18(1), 62-78. doi.org/10.1080/09297049.2011.575772
- Loosli, S. V., Buschkuhl, M., Perrig, W. J., & Jaeggi, S. M. (2012). Working memory training improves reading processes in typically developing children. *Child Neuropsychology*, 18(1), 62-78. doi.org/10.1080/09297049.2011.575772
- Lövdén, M., Brehmer, Y., Li, S.-C., & Lindenberger, U. (2012). Training-induced compensation versus magnification of individual differences in memory performance. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(141), 1-14. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00141
- Lu, L., Leonard, C., Thompson, P., Kan, E., Jolley, J., Welcome, S., Sowell, E. (2006). Normal Developmental Changes in Inferior Frontal Gray Matter Are Associated with Improvement in Phonological Processing: A Longitudinal MRI Analysis. *Cerebral Cortex*, 17(5), 1092-1099. doi.org/10.1093/cercor/bhl019
- Lubin, A., Rossi, S., Lanoë, C., Vidal, J., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Expertise, inhibitory control and arithmetic word problems: A negative priming study in mathematics experts. *Learning and Instruction*, 45, 40-48. doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.06.004
- Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O., & Borst, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105(3), 701-708. doi.org/10.1037/a0032625

- Luna, B., & Sweeney, J. A. (2001). Studies of brain and cognitive maturation through childhood and adolescence: a strategy for testing neurodevelopmental hypotheses. *Schizophrenia bulletin*, 27(3), 443–455.
- 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., Marek, S., Larsen, B., Tervo-Clemmens, B., & Chahal, R. (2015). An Integrative Model of the Maturation of Cognitive Control. *Annual Review of Neuroscience*, 38(1), 151-170.  
doi.org/10.1146/annurev-neuro-071714-034054
- Luna, B., Padmanabhan, A., & O’Hearn, K. (2010). What has fMRI told us about the Development of Cognitive Control through Adolescence? *Brain and Cognition*, 72(1), 101-113.  
doi.org/10.1016/j.bandc.2009.08.005
- Lussier, M., Gagnon, C., & Bherer, L. (2012). An Investigation of Response and Stimulus Modality Transfer Effects after Dual-Task Training in Younger and Older. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(129), 1-11. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00129
- Lustig, C., Shah, P., Seidler, R., & Reuter-Lorenz, P. A. (2009). Aging, Training, and the Brain: A Review and Future Directions. *Neuropsychology Review*, 19(4), 504-522. doi.org/10.1007/s11065-009-9119-9
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(8), 4398–4403.
- Mangin, J.-F., Jouvent, E., & Cachia, A. (2010). In-vivo measurement of cortical morphology: means and meanings: *Current Opinion in Neurology*, 1. doi.org/10.1097/WCO.0b013e32833a0afc
- Manuel, A. L., Grivel, J., Bernasconi, F., Murray, M. M., & Spierer, L. (2010). Brain Dynamics Underlying Training-Induced Improvement in Suppressing Inappropriate Action. *Journal of Neuroscience*, 30(41), 13670-13678. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2064-10.2010
- Manuel, Aurelie L., Bernasconi, F., & Spierer, L. (2013). Plastic modifications within inhibitory control networks induced by practicing a stop-signal task: An electrical neuroimaging study. *Cortex*, 49(4), 1141-1147. doi.org/10.1016/j.cortex.2012.12.009
- Maraver, M. J., Bajo, M. T., & Gomez-Ariza, C. J. (2016). Training on Working Memory and Inhibitory Control in Young Adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(588), 1-18.  
doi.org/10.3389/fnhum.2016.00588
- Marcovitch, S., O'Brien, M., Calkins, S. D., Leerkes, E. M., Weaver, J. M., & Levine, D. W. (2015). A Longitudinal Assessment of the Relation between Executive Function and Theory of Mind at 3, 4, and 5 Years. *Cognitive Development*, 33, 40-55.

- Mareschal, D., Johnson, M. H., Sirois, S., Thomas, M. S. C., Spratling, M., & Westermann, G. (2007). *Neuroconstructivism: How the brain constructs cognition*. Oxford University Press.
- Martin-Rhee, M. M., & Bialystok, E. (2008). The development of two types of inhibitory control in monolingual and bilingual children. *Bilingualism: Language and Cognition*, 11(1), 81-93. doi.org/10.1017/S1366728907003227
- Mata, R., Josef, A. K., & Hertwig, R. (2016). Propensity for Risk Taking Across the Life Span and Around the Globe. *Psychological Science*, 27(2), 231-243. doi.org/10.1177/0956797615617811
- McCrink, K., & Wynn, K. (2004). Large-Number Addition and Subtraction by 9-Month-Old Infants. *Psychological Science*, 15(11), 776-781. doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00755.x
- Mehler, J., & Bever, T. G. (1967). Cognitive capacity of very young children. *Science*, 158(3797), 141-142.
- Melby-Lervag, M., & Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, 49(2), 270-291.
- Metcalf, J., & Mischel, W. (1999). A Hot/Cool-System Analysis of Delay of Gratification: Dynamics of Willpower. *Psychological Review*, 106(1), 3-19.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24(1), 167-202.
- Miller, S. A. (1976). Nonverbal Assessment of Piagetian Concepts. *Psychological Bulletin*, 83(3), 405-430.
- Millner, A. J., Jaroszewski, A. C., Chamarthi, H., & Pizzagalli, D. A. (2012). Behavioral and electrophysiological correlates of training-induced cognitive control improvements. *Neuroimage*, 63(2), 742-753.
- Mishkin, M. (1964) Perseveration of central sets after frontal lesions in monkeys. In *The Frontal Granular Cortex and Behavior* (Warren, J.M. and Akert, K., Eds), pp. 219-241, McGraw-Hill
- 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.org/10.1177/0963721411429458
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. doi.org/10.1006/cogp.1999.0734
- Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., Ross, S. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(7), 2693-2698.

- Molen, M. J. V. der, Luit, J. E. H. V., Molen, M. W. V. der, Klugkist, I., & Jongmans, M. J. (2010). Effectiveness of a computerised working memory training in adolescents with mild to borderline intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54(5), 433-447. doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01285.x
- Morrison, A. B., & Chein, J. M. (2011). Does working memory training work? The promise and challenges of enhancing cognition by training working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(1), 46-60.
- Mulder, H., Verhagen, J., Van der Ven, S. H. G., Slot, P. L., & Leseman, P. P. M. (2017). Early Executive Function at Age Two Predicts Emergent Mathematics and Literacy at Age Five. *Frontiers in Psychology*, 8(1706), 1-14. doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01706
- Munakata, Y., Snyder, H. R., & Chatham, C. H. (2012). Developing Cognitive Control: Three Key Transitions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(2), 71-77. doi.org/10.1177/0963721412436807
- Nee, D. E., & Brown, J. W. (2013). Dissociable Frontal–Striatal and Frontal–Parietal Networks Involved in Updating Hierarchical Contexts in Working Memory. *Cerebral Cortex*, 23(9), 2146-2158. doi.org/10.1093/cercor/bhs194
- Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012). Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 12(2), 241-268. doi.org/10.3758/s13415-011-0083-5
- 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. doi.org/10.1037//0033-2909.126.2.220
- Noack, H., Lövdén, M., Schmiedek, F., & Lindenberger, U. (2009). Cognitive plasticity in adulthood and old age: gauging the generality of cognitive intervention effects. *Restorative neurology and neuroscience*, 27(5), 435–453.
- Noble, K. G., Houston, S. M., Brito, N. H., Bartsch, H., Kan, E., Kuperman, J. M., Sowell, E. R. (2015). Family income, parental education and brain structure in children and adolescents. *Nature Neuroscience*, 18(5), 773-778. doi.org/10.1038/nn.3983
- Noble, K. G., McCandliss, B. D., & Farah, M. J. (2007). Socioeconomic gradients predict individual differences in neurocognitive abilities. *Developmental Science*, 10(4), 464-480. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00600.x

- Noble, K. G., Norman, M. F., & Farah, M. J. (2005). Neurocognitive correlates of socioeconomic status in kindergarten children. *Developmental Science*, 8(1), 74-87. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00394.x
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to Action. In *Consciousness and Self-Regulation* (p. 1-18). Springer, Boston, MA. doi.org/10.1007/978-1-4757-0629-1\_1
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4
- Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75-79. doi.org/10.1038/nn1165
- Ono, M., Kubik, S., & Abernathy, C. (1990). *Atlas of the Cerebral Sulci* (Georg Thie). New-York
- Owen, A. M., Hampshire, A., Grahn, J. A., Stenton, R., Dajani, S., Burns, A. S., et al. (2010). Putting brain training to the test. *Nature*, 465(7299), 775-778.
- Panizzon, M. S., Fennema-Notestine, C., Eyer, L. T., Jernigan, T. L., Prom-Wormley, E., Neale, M., et al. (2009). Distinct genetic influences on cortical surface area and cortical thickness. *Cerebral Cortex*, 19(11), 2728-2735.
- Pascual-leone, J. (1987). Organismic Processes for Neo-Piagetian Theories: A Dialectical Causal Account of Cognitive Development. *International Journal of Psychology*, 22(5-6), 531-570. doi.org/10.1080/00207598708246795
- Paulsen, D. J., Hallquist, M. N., Geier, C. F., & Luna, B. (2015). Effects of incentives, age, and behavior on brain activation during inhibitory control: A longitudinal fMRI study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 11, 105-115. doi.org/10.1016/j.dcn.2014.09.003
- Paus, T., Collins, D. L., Evans, A. C., Leonard, G., Pike, B., & Zijdenbos, A. (2001). Maturation of white matter in the human brain: a review of magnetic resonance studies. *Brain research bulletin*, 54(3), 255-266.
- Pessoa, L. (2009). How do emotion and motivation direct executive control? *Trends in Cognitive Sciences*, 13(4), 160-166. doi.org/10.1016/j.tics.2009.01.006
- Piaget, J., & Szeminska, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. [The development of the number concept in the child.]. Oxford, England: Delachaux, Niestle.
- Piaget, Jean, & Inhelder, B. (1948). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. [Representation of space by the child.]. 75006 Paris, France: Presses Universitaires de France.
- Poirel, N., Borst, G., Simon, G., Rossi, S., Cassotti, M., Pineau, A., & Houdé, O. (2012). Number Conservation is Related to Children's Prefrontal Inhibitory Control: An fMRI Study of a Piagetian Task. *PLoS ONE*, 7(7), e40802. doi.org/10.1371/journal.pone.0040802

- Posner, M., & Rothbart, M. (2005). Influencing brain networks: implications for education. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3), 99-103. doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.007
- Putkinen, V., & Saarikivi, K. (2018). Neural correlates of enhanced executive functions: is less more?: Neural correlates of enhanced executive functions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1423(1), 117-125. doi.org/10.1111/nyas.13645
- Rakic, P. (1988). Specification of cerebral cortical areas. *Science*, 241(4862), 170-176.
- Rakic, P. (2000). Radial unit hypothesis of neocortical expansion. *Novartis Found Symp*, 228, 30-42; discussion 42-52.
- Raznahan, A., Greenstein, D., Lee, N. R., Clasen, L. S., & Giedd, J. N. (2012). Prenatal growth in humans and postnatal brain maturation into late adolescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(28), 11366-11371. doi.org/10.1073/pnas.1203350109
- Raznahan, A., Shaw, P., Lalonde, F., Stockman, M., Wallace, G. L., Greenstein, D., et al. (2011). How does your cortex grow? *Journal of Neuroscience*, 31(19), 7174-7177.
- Rebok, G. W., Carlson, M. C., & Langbaum, J. B. (2007). Training and maintaining memory abilities in healthy older adults: traditional and novel approaches. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 62(Special\_Issue\_1), 53-61.
- Reinert, K. R. S., Po'e, E. K., & Barkin, S. L. (2013). The Relationship between Executive Function and Obesity in Children and Adolescents: A Systematic Literature Review. *Journal of Obesity*, 2013, 1-10. doi.org/10.1155/2013/820956
- Reuter, M., Rosas, H. D., & Fischl, B. (2010). Highly accurate inverse consistent registration: A robust approach. *NeuroImage*, 53(4), 1181-1196. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.07.020
- Reuter, M., Schmansky, N. J., Rosas, H. D., & Fischl, B. (2012). Within-subject template estimation for unbiased longitudinal image analysis. *NeuroImage*, 61(4), 1402-1418. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.02.084
- Ribner, A. D., Willoughby, M. T., & Blair, C. B. (2017). Executive Function Buffers the Association between Early Math and Later Academic Skills. *Frontiers in Psychology*, 8. doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00869
- Roberts, B. W., Kuncel, N. R., Shiner, R., Caspi, A., & Goldberg, L. R. (2007). The Power of Personality: The Comparative Validity of Personality Traits, Socioeconomic Status, and Cognitive Ability for Predicting Important Life Outcomes. *Perspectives on Psychological Science*, 2(4), 313-345. doi.org/10.1111/j.1745-6916.2007.00047.x
- Rode, C., Robson, R., Purviance, A., Geary, D. C., & Mayr, U. (2014). Is Working Memory Training Effective? A Study in a School Setting. *PLoS ONE*, 9(8), e104796. doi.org/10.1371/journal.pone.0104796

- Rodríguez-Pujadas, A., Sanjuán, A., Fuentes, P., Ventura-Campos, N., Barrós-Loscertales, A., & Ávila, C. (2014). Differential neural control in early bilinguals and monolinguals during response inhibition. *Brain and Language*, 132, 43-51. doi.org/10.1016/j.bandl.2014.03.003
- Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Inhibitory control and decimal number comparison in school-aged children. *Plos One*, 12(11):e0188276. doi: 10.1371/journal.pone.0188276.
- Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2018). Inhibition of the whole number bias in decimal number comparison: A developmental negative priming study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 117, 240-247. doi.org/10.1016/j.jecp.2018.08.010
- Rosas, H. D., Liu, A. K., Hersch, S., Glessner, M., Ferrante, R. J., Salat, D. H., Fischl, B. (2002). Regional and progressive thinning of the cortical ribbon in Huntington's disease. *Neurology*, 58(5), 695-701. https://doi.org/10.1212/WNL.58.5.695
- Rose, S. A., Feldman, J. F., & Jankowski, J. J. (2011). Modeling a cascade of effects: the role of speed and executive functioning in preterm/full-term differences in academic achievement: Executive function in preterm adolescents. *Developmental Science*, 14(5), 1161-1175. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01068.x
- Rubia, K., Lim, L., Ecker, C., Halari, R., Giampietro, V., Simmons, A., Smith, A. (2013). Effects of age and gender on neural networks of motor response inhibition: From adolescence to mid-adulthood. *NeuroImage*, 83, 690-703. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.078
- Rubia, K., Russell, T., Overmeyer, S., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., Sharma, T., Taylor, E. (2001). Mapping Motor Inhibition: Conjunctive Brain Activations across Different Versions of Go/No-Go and Stop Tasks. *NeuroImage*, 13(2), 250-261. doi.org/10.1006/nimg.2000.0685
- Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., & Taylor, E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *NeuroImage*, 20(1), 351-358. doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00275-1
- Rueda Cuerva, M. R., Checa Fernández, P., & Combata, L. (2012). Enhanced efficiency of the executive attention network after training in preschool children: Immediate and after two months effects. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2S(2012), S192-S204. doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.004
- Rueda, M. R., Checa, P., & Combata, L. M. (2012). Enhanced efficiency of the executive attention network after training in preschool children: immediate changes and effects after two months. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(1), S192-204.

- Rueda, M. R., Rothbart, M. K., McCandliss, B. D., Saccomanno, L., & Posner, M. I. (2005). Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 102(41), 14931-14936.
- Rushworth, M. F., Nixon, P. D., Eacott, M. J., & Passingham, R. E. (1997). Ventral prefrontal cortex is not essential for working memory. *Journal of Neuroscience*, 17(12), 4829–4838.
- Saarikivi, K., Putkinen, V., Tervaniemi, M., & Huotilainen, M. (2016). Cognitive flexibility modulates maturation and music-training-related changes in neural sound discrimination. *European Journal of Neuroscience*, 44(2), 1815-1825. doi.org/10.1111/ejn.13176
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J., Ibañez, V., Deiber, M. P., Dold, G., & Hallett, M. (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature*, 380(6574), 526-528. doi.org/10.1038/380526a0
- Salat, D. H. (2004). Thinning of the Cerebral Cortex in Aging. *Cerebral Cortex*, 14(7), 721-730. doi.org/10.1093/cercor/bhh032
- Salminen, T., Strobach, T., & Schubert, T. (2012). On the impacts of working memory training on executive functioning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(166), 1-14. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00166
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive Functioning as a Potential Mediator of Age-Related Cognitive Decline in Normal Adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132(4), 566-594. doi.org/10.1037/0096-3445.132.4.566
- Sampaio-Baptista, C., & Johansen-Berg, H. (2017). White Matter Plasticity in the Adult Brain. *Neuron*, 96(6), 1239-1251. doi.org/10.1016/j.neuron.2017.11.026
- Satterthwaite, T. D., Wolf, D. H., Erus, G., Ruparel, K., Elliott, M. A., Gennatas, E. D., et al. (2013). Functional maturation of the executive system during adolescence. *Journal of Neuroscience*, 33(41), 16249-16261.
- Scarpina, F., & Tagini, S. (2017). The Stroop Color and Word Test. *Frontiers in Psychology*, 8(557), 1-8. doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00557
- Schmiedek, (2010). Hundred days of cognitive training enhance broad cognitive abilities in adulthood: findings from the COGITO study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2(27), 1-10 doi.org/10.3389/fnagi.2010.00027
- Schneiders, J. A., Opitz, B., Tang, H., Deng, Y., Xie, C., Li, H., & Mecklinger, A. (2012). The impact of auditory working memory training on the fronto-parietal working memory network. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(173), 1-14. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00173

- Schumacher, R. F., & Fuchs, L. S. (2012). Does understanding relational terminology mediate effects of intervention on compare word problems? *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(4), 607-628. doi.org/10.1016/j.jecp.2011.12.001
- Schwaighofer, M., Fischer, F., & Bühner, M. (2015). Does Working Memory Training Transfer? A Meta-Analysis Including Training Conditions as Moderators. *Educational Psychologist*, 50(2), 138-166. doi.org/10.1080/00461520.2015.1036274
- Ségonne, F., Dale, A. M., Busa, E., Glessner, M., Salat, D., Hahn, H. K., & Fischl, B. (2004). A hybrid approach to the skull stripping problem in MRI. *NeuroImage*, 22(3), 1060-1075. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.03.032
- Segonne, F., Pacheco, J., & Fischl, B. (2007). Geometrically Accurate Topology-Correction of Cortical Surfaces Using Nonseparating Loops. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 26(4), 518-529. doi.org/10.1109/TMI.2006.887364
- Shaw, P., Greenstein, D., Lerch, J., Clasen, L., Lenroot, R., Gogtay, N., Giedd, J. (2006). Intellectual ability and cortical development in children and adolescents. *Nature*, 440(7084), 676-679. doi.org/10.1038/nature04513
- Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., Wise, S. P. (2008). Neurodevelopmental Trajectories of the Human Cerebral Cortex. *Journal of Neuroscience*, 28(14), 3586-3594. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5309-07.2008
- Shenkin, S. D., Starr, J. M., & Deary, I. J. (2004). Birth Weight and Cognitive Ability in Childhood: A Systematic Review. *Psychological Bulletin*, 130(6), 989-1013. doi.org/10.1037/0033-2909.130.6.989
- Shipstead, Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2012). Is working memory training effective? *Psychological Bulletin*, 138(4), 628-654. doi.org/10.1037/a0027473
- Shulman, E. P., Smith, A. R., Silva, K., Icenogle, G., Duell, N., Chein, J., & Steinberg, L. (2016). The dual systems model: Review, reappraisal, and reaffirmation. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 17, 103-117. doi.org/10.1016/j.dcn.2015.12.010
- Siegler, R. S. (1995). How does change occur: a microgenetic study of number conservation. *Cognitive Psychology*, 28(3), 225-273. doi.org/10.1006/cogp.1995.1006
- Siegler, Robert S. (1987). Some general conclusions about children's strategy choice procedures. *International Journal of Psychology*, 22(5-6), 729-749.
- Siegler, Robert S. (1998). *Emerging Minds: The Process of Change in Children's Thinking*. Oxford University Press.
- Siegler, Robert S. (2007). Cognitive variability. *Developmental Science*, 10(1), 104-109. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00571.x

- Simmonds, D. J., Pekar, J. J., & Mostofsky, S. H. (2008). Meta-analysis of Go/No-go tasks demonstrating that fMRI activation associated with response inhibition is task-dependent. *Neuropsychologia*, 46(1), 224-232. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.015
- Sirois, S., Spratling, M., Thomas, M. S. C., Westermann, G., Mareschal, D., & Johnson, M. H. (2008). Précis of Neuroconstructivism: How the Brain Constructs Cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(03). doi.org/10.1017/S0140525X0800407X
- Sled, J. G., Zijdenbos, A. P., & Evans, A. C. (1998). A nonparametric method for automatic correction of intensity nonuniformity in MRI data. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17(1), 87-97. doi.org/10.1109/42.668698
- Söderqvist, S., Bergman Nutley, S., Ottersen, J., Grill, K. M., & Klingberg, T. (2012). Computerized training of non-verbal reasoning and working memory in children with intellectual disability. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(271), 1-8. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00271
- Souders, D. J., Boot, W. R., Blocker, K., Vitale, T., Roque, N. A., & Charness, N. (2017). Evidence for Narrow Transfer after Short-Term Cognitive Training in Older Adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9(41), 1-10. doi.org/10.3389/fnagi.2017.00041
- Sowell, E. R. (2004). Longitudinal Mapping of Cortical Thickness and Brain Growth in Normal Children. *Journal of Neuroscience*, 24(38), 8223-8231. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1798-04.2004
- Spelke, E. (1994). Initial knowledge: Six suggestions. *Cognition*, 50(1-3), 431-445.
- Spelke, E. S., & Kinzler, K. D. (2007). Core knowledge. *Developmental Science*, 10(1), 89-96. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00569.x
- Spelke. (2004). *Attention and Performance: Functional neuroimaging of visual cognition Vol 20*. Oxford: Oxford University Press.
- Spierer, L., Chavan, C., & Manuel, A. L. (2013). Training-induced behavioral and brain plasticity in inhibitory control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(427), 1-9. doi.org/10.3389/fnhum.2013.00427
- St Clair-Thompson, H. L., & Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(4), 745-759. doi.org/10.1080/17470210500162854
- Starkey, P., Spelke, E. S., & Gelman, R. (1990). Numerical abstraction by human infants. *Cognition*, 36(2), 97-127.
- Steinberg, L. (2010). A dual systems model of adolescent risk-taking. *Developmental Psychobiology*, n/a-n/a. doi.org/10.1002/dev.20445
- Strasburger, V. C., Jordan, A. B., & Donnerstein, E. (2010). Health Effects of Media on Children and Adolescents. *Pediatrics*, peds.2009-2563. doi.org/10.1542/peds.2009-2563

- Strasburger, V. C., Jordan, A. B., & Donnerstein, E. (2012). Health Effects of Media on Children and Adolescents. *Pediatrics*, 125:756–767. doi 10.1542/peds.2009-2563
- Strobach, T., Frensch, P., Müller, H. J., & Schubert, T. (2012). Testing the Limits of Optimizing Dual-Task Performance in Younger and Older Adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00039
- Stroop, J. R. (1935). Studies of Interference in Serial Verbal Reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Stroop, J. R. (1992). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(1), 15.
- Sun, Z. Y., Klöppel, S., Rivière, D., Perrot, M., Frackowiak, R., Siebner, H., & Mangin, J.-F. (2012). The effect of handedness on the shape of the central sulcus. *NeuroImage*, 60(1), 332-339. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.12.050
- Swanson, H. L., & McMurrin, M. (2018). The impact of working memory training on near and far transfer measures: Is it all about fluid intelligence? *Child Neuropsychology*, 24(3), 370-395. doi.org/10.1080/09297049.2017.1280142
- Swick, D., Ashley, V., & Turken, U. (2011). Are the neural correlates of stopping and not going identical? Quantitative meta-analysis of two response inhibition tasks. *NeuroImage*, 56(3), 1655-1665. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.02.070
- Symposium, F. F. (2005). *From Monkey Brain to Human Brain: A Fyssen Foundation Symposium*. MIT Press.
- Takeuchi, H., Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Nagase, T., Kawashima, R. (2012). Regional gray and white matter volume associated with Stroop interference: Evidence from voxel-based morphometry. *NeuroImage*, 59(3), 2899-2907. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.064
- Talanow, T., & Ettinger, U. (2018). Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control training in healthy adults. *Acta Psychologica (Amst)*, 187, 37-53.
- Talanow, T., & Ettinger, U. (2018). Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control training in healthy adults. *Acta Psychologica*, 187, 37-53. doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.04.016
- Tau, G. Z., & Peterson, B. S. (2010). Normal development of brain circuits. *Neuropsychopharmacology*, 35(1), 147.
- Thompson, P. M., Schwartz, C., Lin, R. T., Khan, A. A., & Toga, A. W. (1996). Three-dimensional statistical analysis of sulcal variability in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 16(13), 4261–4274.

- Thompson, P. M., Sowell, E. R., Gogtay, N., Giedd, J. N., Vidal, C. N., Hayashi, K. M., Toga, A. W. (2005). Structural MRI and Brain Development. In *International Review of Neurobiology* (Vol. 67, p. 285-323). Elsevier. doi.org/10.1016/S0074-7742(05)67009-2
- Thompson, P. M., Vidal, C., Giedd, J. N., Gochman, P., Blumenthal, J., Nicolson, R., Rapoport, J. L. (2001). Mapping adolescent brain change reveals dynamic wave of accelerated gray matter loss in very early-onset schizophrenia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(20), 11650–11655.
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science*, 12(1), 106-113. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x
- Tissier, C., Linzarini, A., Allaire-Duquette, G., Mevel, K., Poirel, N., Dollfus, S., Cachia, A. (2018). Sulcal Polymorphisms of the IFC and ACC Contribute to Inhibitory Control Variability in Children and Adults. *Eneuro*, 5(1), ENEURO.0197-17.2018. doi.org/10.1523/ENEURO.0197-17.2018
- Titz, C., & Karbach, J. (2014). Working memory and executive functions: effects of training on academic achievement. *Psychological Research*, 78(6), 852-868. doi.org/10.1007/s00426-013-0537-1
- Traverso, L., Viterbori, P., & Usai, M. C. (2015). Improving executive function in childhood: evaluation of a training intervention for 5-year-old children. *Frontiers in Psychology*, 6. doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00525
- van der Ven, S. H. G., Kroesbergen, E. H., Boom, J., & Leseman, P. P. M. (2013). The structure of executive functions in children: A closer examination of inhibition, shifting, and updating. *British Journal of Developmental Psychology*, 31, 70-87. doi.org/10.1111/j.2044-835x.2012.02079.x
- Velanova, K., Wheeler, M. E., & Luna, B. (2009). The Maturation of Task Set-Related Activation Supports Late Developmental Improvements in Inhibitory Control. *Journal of Neuroscience*, 29(40), 12558-12567. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1579-09.2009
- Verbruggen, F., & Houter, J. D. (2007). Do emotional stimuli interfere with response inhibition? Evidence from the stop signal paradigm. *Cognition and Emotion*, 21(2), 391-403. doi.org/10.1080/02699930600625081
- Verbruggen, F., & Logan, G. D. (2008). Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 418-424. doi.org/10.1016/j.tics.2008.07.005
- Verbruggen, F., Logan, G. D., & Stevens, M. A. (2008). STOP-IT: Windows executable software for the stop-signal paradigm. *Behavior Research Methods*, 40(2), 479-483. doi.org/10.3758/BRM.40.2.479

- Verhaeghen, P. (2013). *The Elements of Cognitive Aging: Meta-Analyses of Age-Related Differences in Processing Speed and Their Consequences*. Oxford University Press.
- Verhaeghen, P., & Marcoen, A. (1996). On the mechanisms of plasticity in young and older adults after instruction in the method of loci: Evidence for an amplification model. *Psychology and aging, 11*(1), 164.
- Verhaeghen, P., Marcoen, A., & Goossens, L. (1992). Improving memory performance in the aged through mnemonic training: A meta-analytic study. *Psychology and aging, 7*(2), 242.
- von Suchodoletz, A., Fäsche, A., & Skuballa, I. T. (2017). The Role of Attention Shifting in Orthographic Competencies: Cross-Sectional Findings from 1st, 3rd, and 8th Grade Students. *Frontiers in Psychology, 8*(1665), 1-16. doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01665
- Watanabe, J., Sugiura, M., Sato, K., Sato, Y., Maeda, Y., Matsue, Y., Kawashima, R. (2002). The Human Prefrontal and Parietal Association Cortices Are Involved in NO-GO Performances: An Event-Related fMRI Study. *NeuroImage, 17*(3), 1207-1216. doi.org/10.1006/nimg.2002.1198
- Westermann, G., Mareschal, D., Johnson, M. H., Sirois, S., Spratling, M. W., & Thomas, M. S. C. (2007). Neuroconstructivism. *Developmental Science, 10*(1), 75-83. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00567.x
- Westlye, L. T., Grydeland, H., Walhovd, K. B., & Fjell, A. M. (2011). Associations between regional cortical thickness and attentional networks as measured by the attention network test. *Cerebral Cortex, 21*(2), 345-356.
- Westlye, L. T., Grydeland, H., Walhovd, K. B., & Fjell, A. M. (2011). Associations between Regional Cortical Thickness and Attentional Networks as Measured by the Attention Network Test. *Cerebral Cortex, 21*(2), 345-356. doi.org/10.1093/cercor/bhq101
- 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. doi.org/10.1037/0012-1649.44.2.575
- Wiebe, S. A., Sheffield, T., Nelson, J. M., Clark, C. A. C., Chevalier, N., & Espy, K. A. (2011). The structure of executive function in 3-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology, 108*(3), 436-452. doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008
- Wiebe, S., & Karbach, J. (2017). *Executive functions: development across the life span*. New York: Taylor & Francis.
- Wierenga, L. M., Langen, M., Oranje, B., & Durston, S. (2014). Unique developmental trajectories of cortical thickness and surface area. *Neuroimage, 87*, 120-126.
- Wilkinson, A. J., & Yang, L. (2016). Inhibition Plasticity in Older Adults: Practice and Transfer Effects Using a Multiple Task Approach. *Neural Plasticity, 2016*, 1-12. doi.org/10.1155/2016/9696402

- Willoughby, M. T., Blair, C. B., Wirth, R. J., Greenberg, M. (2010). The measurement of executive function at age 3 years: Psychometric properties and criterion validity of a new battery of tasks. *Psychological Assessment*, 22(2), 306-317. doi.org/10.1037/a0018708
- Willoughby, M. T., Wirth, R. J., & Blair, C. B. (2011). Contributions of modern measurement theory to measuring executive function in early childhood: An empirical demonstration. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 414-435. doi.org/10.1016/j.jecp.2010.04.007
- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H., & Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development: typical developmental trends. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(4), 561-575. doi.org/10.1111/1469-7610.00145
- Wu, K. K., Chan, S. K., Leung, P. W. L., Liu, W.-S., Leung, F. L. T., & Ng, R. (2011). Components and Developmental Differences of Executive Functioning for School-Aged Children. *Developmental Neuropsychology*, 36(3), 319-337. doi.org/10.1080/87565641.2010.549979
- Wujcik, R., Nowak, M., & Nęcka, E. (2017). Enhancement of Executive Control through Short-term Cognitive Training: Far-transfer Effects on General Fluid Intelligence. *Polish Psychological Bulletin*, 48(1), 72-78. doi.org/10.1515/ppb-2017-0009
- Wynn, K. (2000). Findings of addition and subtraction in infants are robust and consistent: reply to Wakeley, Rivera, and Langer. *Child Development*, 71(6), 1535-1536; discussion 1537-1539.
- Wynn, Karen. (1990). Children's understanding of counting. *Cognition*, 36(2), 155-193.
- Wynn, Karen. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), 749-750. doi.org/10.1038/358749a0
- Zacks, R. T., & Hasher, L. (1994). Directed ignoring: Inhibitory regulation of working memory. In *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (p. 241-264). San Diego, CA, US: Academic Press.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), 547-558. doi.org/10.1038/nrn2152
- Zelazo, P. D., & Carlson, S. M. (2012). Hot and Cool Executive Function in Childhood and Adolescence: Development and Plasticity. *Child Development Perspectives*, n/a-n/a. doi.org/10.1111/j.1750-8606.2012.00246.x
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002). CHAPTER TWENTY. *Blackwell Handbook of Childhood Cognitive Development*, 445.
- Zhang, H., Shen, D., & Lin, W. (2018). Resting-state functional MRI studies on infant brains: A decade of gap-filling efforts. *NeuroImage*. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.07.004

- Zhang, R., Geng, X., & Lee, T. M. C. (2017). Large-scale functional neural network correlates of response inhibition: an fMRI meta-analysis. *Brain Structure and Function*, 222(9), 3973-3990.
- Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. R. (2018). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental Science*, 21(1), e12511. doi.org/10.1111/desc.12511
- Zhao, X., Chen, L., Fu, L., & Maes, J. H. R. (2015). "Wesley says": a children's response inhibition playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Frontiers in Psychology*, 6(207), 1-7. doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00207
- Zilles, K., Palomero-Gallagher, N., & Amunts, K. (2013). Development of cortical folding during evolution and ontogeny. *Trends in Neurosciences*, 36(5), 275-284. doi.org/10.1016/j.tins.2013.01.006
- Zinke, K., Einert, M., Pfennig, L., & Kliegel, M. (2012). Plasticity of Executive Control through Task Switching Training in Adolescents. *Frontiers in Human Neuroscience*. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(41), 1-15. doi.org/10.3389/fnhum.2012.00041
- Zinke, K., Zeintl, M., Eschen, A., Herzog, C., & Kliegel, M. (2012). Potentials and Limits of Plasticity Induced by Working Memory Training in Old-Old Age. *Gerontology*, 58(1), 79-87. doi.org/10.1159/000324240
- Zinke, K., Zeintl, M., Rose, N. S., Putzmann, J., Pydde, A., & Kliegel, M. (2014). Working memory training and transfer in older adults: Effects of age, baseline performance, and training gains. *Developmental Psychology*, 50(1), 304-315. doi.org/10.1037/a0032982



# ANNEXES

**Annexe n°1** : Les trois planches expérimentales (Carte A, C et B) de la tâche de Stroop (1935).



# TEST DE STROOP

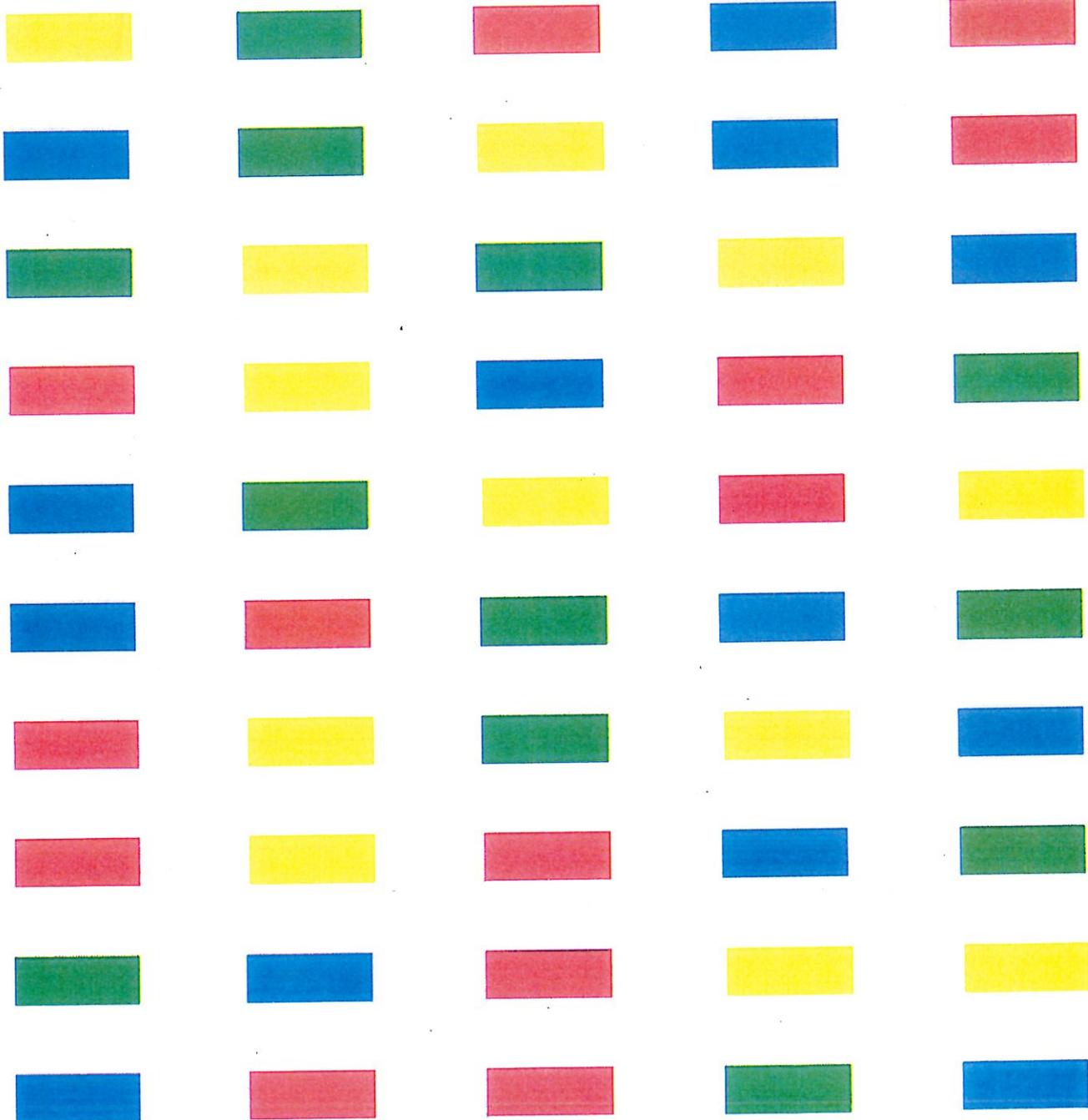
## Carte A

VERT	JAUNE	ROUGE	BLEU	JAUNE
VERT	ROUGE	BLEU	VERT	BLEU
ROUGE	JAUNE	BLEU	VERT	ROUGE
JAUNE	JAUNE	VERT	BLEU	ROUGE
VERT	JAUNE	BLEU	ROUGE	ROUGE
BLEU	JAUNE	VERT	JAUNE	ROUGE
VERT	BLEU	ROUGE	VERT	BLEU
JAUNE	JAUNE	BLEU	ROUGE	VERT
BLEU	JAUNE	VERT	ROUGE	BLEU
VERT	ROUGE	JAUNE	VERT	JAUNE



# TEST DE STROOP

## Carte C





# TEST DE STROOP

## Carte B

BLEU	JAUNE	VERT	ROUGE	ROUGE
VERT	ROUGE	JAUNE	BLEU	JAUNE
VERT	ROUGE	VERT	JAUNE	BLEU
BLEU	ROUGE	JAUNE	VERT	BLEU
VERT	ROUGE	JAUNE	JAUNE	VERT
BLEU	ROUGE	BLEU	JAUNE	VERT
ROUGE	JAUNE	BLEU	VERT	ROUGE
BLEU	VERT	ROUGE	JAUNE	JAUNE
BLEU	JAUNE	ROUGE	VERT	ROUGE
VERT	BLEU	VERT	BLEU	ROUGE



**Annexe n°2** : Documents d'information utilisés pour le recrutement dans le cadre du projet APEX, dont un destiné aux enfants et l'autre aux parents.



# LES ENFANTS vont à Cyceron !

Un centre de recherche sur le cerveau



Livret d'information destiné aux enfants

et conçu par les chercheurs du

Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation  
de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS) – PROJET ANR APEX

Réalisation: Olivier Houdé

/illustrations inspirées de Marie-Laure Viney

## Mode d'emploi

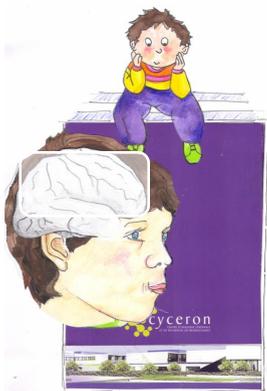
Ce livret pourra être lu seul par l'enfant ou avec ses parents qui lui expliqueront les mots difficiles. Il pourra aussi être lu à l'école avec le maître ou la maîtresse.

La décision de participer ou non à cette recherche (voir la dernière page du livret) devra se prendre en discutant avec les parents.

Ceux-ci recevront par ailleurs un document d'information plus complet et technique qui leur est spécifiquement destiné, ainsi qu'un formulaire de consentement à signer pour l'enfant mineur dont ils sont responsables.

Ce consentement et l'accord de l'enfant ne seront formellement sollicités que lorsque les parents et leur enfant auront été plus amplement informés par un médecin associé au laboratoire sur l'objectif de la recherche ainsi que sur son cadre légal et éthique.\*

\* Cette recherche a obtenu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP Nord Ouest III) et l'autorisation de mise en œuvre du Ministère de la Santé.

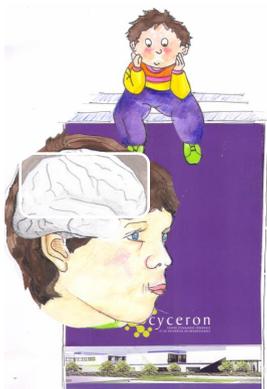


# Bonjour !

Si tu es d'accord, on va réaliser ensemble une *recherche scientifique* sur ce qu'il y a dans ta tête : *ton cerveau* ! ... pour comprendre comment il réfléchit, comment il apprend. Ainsi, grâce à toi, on pourra savoir plus de choses sur le cerveau des enfants !

C'est quoi une recherche scientifique ? C'est un peu comme un jeu, avec des règles précises.

Ce que tu dois savoir avant tout, c'est que tu as des droits : « *les droits de l'enfant* ».



# Mes droits

Pour le jeu (la recherche)  
qu'on va faire ensemble, tu as le droit  
de donner ton avis : \*

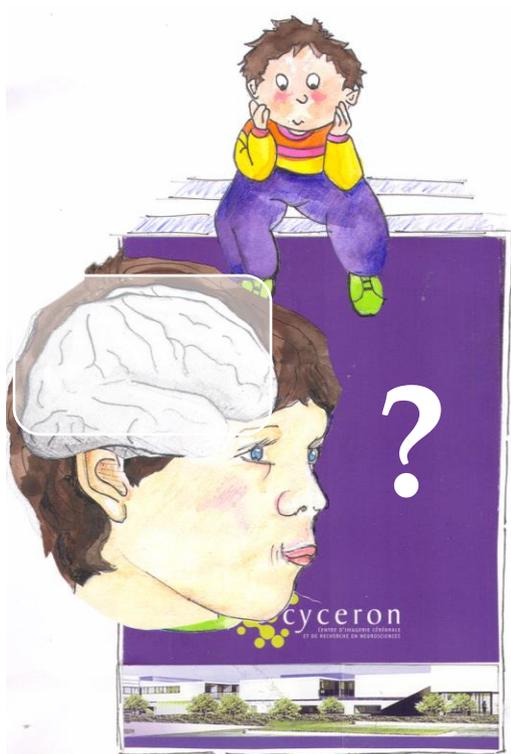
tu peux dire OUI si tu veux le faire  
ou dire NON si tu ne veux pas le faire.

Mais pour cela, tu dois savoir  
ce qu'on va faire !

Ce petit livre te l'explique.

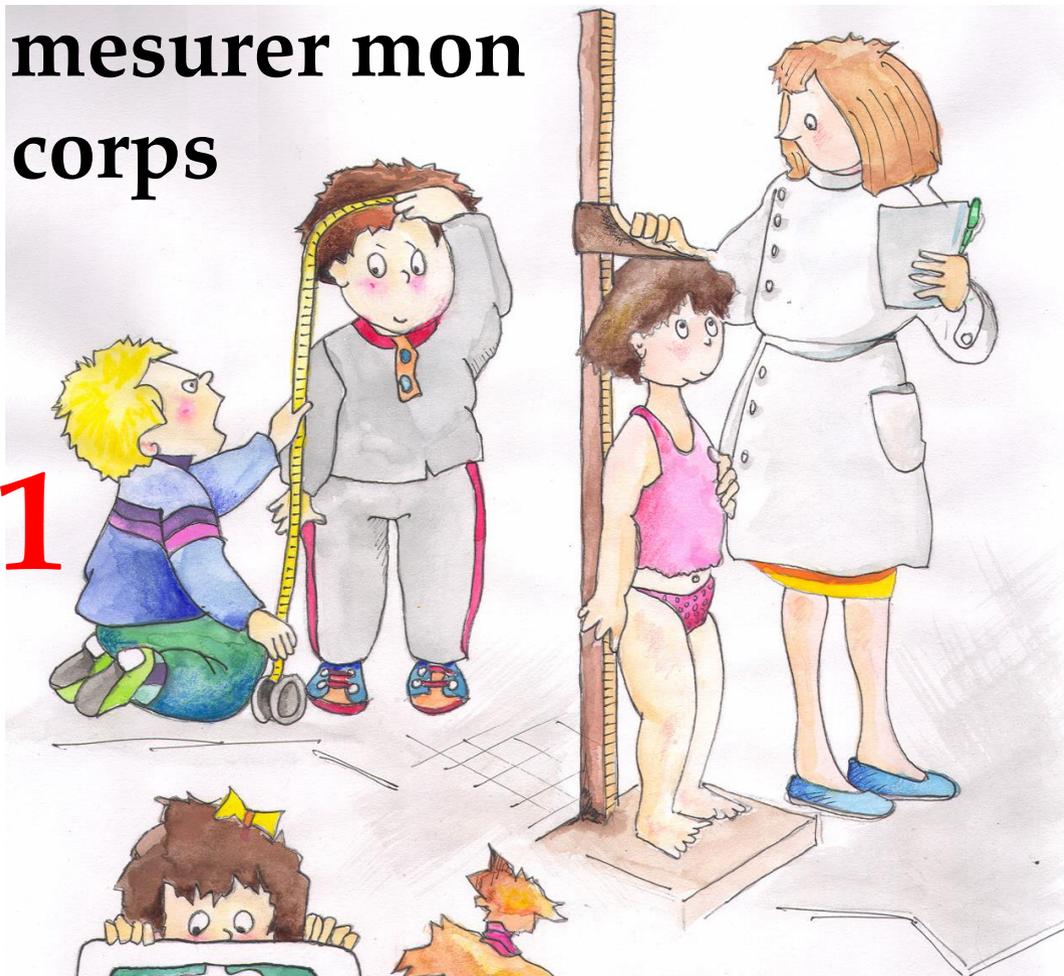
*\*Et tu pourras toujours changer d'avis !*

# Je m'informe ! en 4 points



# On peut mesurer mon corps

1



2



... et même  
voir à  
l'intérieur !

1

Tu sais que l'on peut *mesurer ton corps*. Avec un ami, ou ton frère ou ta sœur, tu peux te mesurer en utilisant un « mètre ruban » pour savoir si tu as grandi !

Avec l'aide d'une grande personne tu peux aussi *te servir d'un instrument très précis et efficace*, une toise, pour mesurer ta taille. Tu as déjà certainement fait cela chez le docteur.

2

Tu peux aussi voir *à l'intérieur de ton corps* ! Par exemple, voir tes os (ton squelette) sur une radio. Tu l'as peut-être déjà fait chez le médecin. Il ne faut pas avoir peur : cela ne fait pas mal du tout !

# Qu'y a-t-il dans ma tête ?



3



Le cerveau



4



Le médecin

**Pour voir le cerveau :**  
**L'IRM = Imagerie par Résonance Magnétique**

3

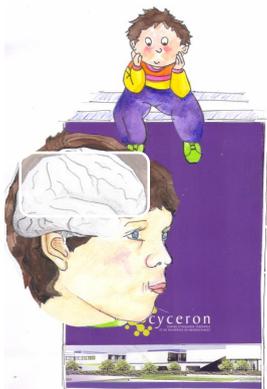
... Et à l'intérieur de ta tête, il y a quoi ? *Ton cerveau ! C'est lui qui commande ton corps et aussi ta pensée.*

4

Avec l'aide d'un médecin et d'une caméra spéciale, on peut voir ton cerveau ! Pour cela, tu dois t'allonger pendant environ 45 minutes dans un tunnel... un peu comme dans une fusée ! Regarde sur le dessin. *La règle principale du jeu est de ne pas bouger du tout (comme une statue !)* sinon l'image de ton cerveau sera floue. Tu pourras *toujours* parler avec le médecin ou un chercheur.

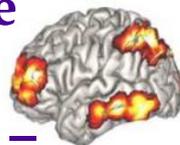


Ta maman ou ton papa ne sera pas loin ! Cette caméra fera beaucoup de bruit, mais un casque posé sur tes oreilles te protégera du bruit. Comme une radio, tu ne sentiras rien de spécial et cela ne fera pas mal du tout.

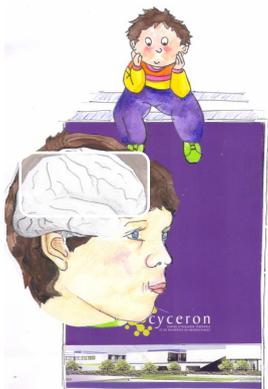


# Ce que je dois faire

*A Cyceron.* – Tu devras venir 2 fois (en 1 mois) dans la caméra spéciale IRM de Cyceron pour faire des images successives de ton cerveau – si toi et tes parents êtes d'accord, une mesure génétique (petit  prélèvement de salive) sera réalisée *en plus* la première fois. C'est utile pour mieux comprendre comment fonctionne ton cerveau.



*A l'école.* – A chaque fois, quelques jours après l'IRM, tu devras aussi faire des petits jeux et exercices simples avec un chercheur, à Cyceron ou à l'école (au plus pratique), pendant environ 1 heure et demie.



# Ce que je dois faire

*A la maison.* – Tu devras aussi faire des petits jeux sur une tablette tactile (que tu recevras) pendant 15 minutes, tous les jours de la semaine à la maison, pendant un mois (entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> examen d'IRM). Tout te sera bien expliqué !



\*\*\*

Et à la fin, on te donnera un cadeau *pour te remercier de nous avoir si bien aidés à comprendre le cerveau !*



# Pourquoi ?

Pour voir le cerveau qui apprend en images et mieux comprendre comment ton cerveau travaille, change et s'adapte quand tu t'entraînes tous les jours à un exercice *éducatif* particulier sur une tablette tactile.



# Pour en savoir plus



Tu peux aussi demander d'autres explications à tes parents, à ton maître ou à ta maîtresse à l'école, ainsi qu'aux adultes qui vont t'accompagner pour cette recherche : les médecins et les psychologues.

N'hésite surtout pas à poser des questions !

Maintenant *tu vas bien réfléchir* et tu vas décider si tu veux participer à cette recherche.

On ne sait pas encore tout sur le cerveau, surtout sur celui des enfants, et si tu acceptes de participer, on en saura plus !

Après avoir réfléchi,  
**je décide !**



Entoure le mot qui correspond à ton choix  
et écris ton nom en dessous.

*Même si tu as dit OUI, tu pourras  
toujours arrêter la recherche à n'importe quel  
moment si tu le souhaites !*



Cyceron

Agence Nationale de la Recherche  
PLATEFORME D'IMAGERIE BIOMÉDICALE



ANR



LaPsyDÉ

# LIVRET D'ACCUEIL

Destiné aux parents d'un enfant participant à une recherche biomédicale en Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)

**Projet APEX**

**"Apprentissages exécutifs et cerveau chez les enfants d'âge scolaire"**

**Contact : Katell MEVEL ou Lisa DELALANDE**

Tél : 02.31.47.01.44

Email : [mevel@cyceron.fr](mailto:mevel@cyceron.fr) ou [delalande@cyceron.fr](mailto:delalande@cyceron.fr)

Site Internet du laboratoire :

<http://www.lapsyde.com/>



UNIVERSITÉ  
**PARIS  
DESCARTES**

MEMBRE DE

**USPC**  
Université Sorbonne  
Paris Cité



**UNICAEN**  
UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE



# JE PARTICIPE À LA RECHERCHE SUR LE CERVEAU

**Au Centre Cyceron**



## INTRODUCTION

---

### **BONJOUR,**

Tout d'abord, merci de votre intérêt pour nos recherches et de l'éventuelle participation de votre enfant à une étude en Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Ce livret a été préparé afin de répondre aux questions que vous vous posez sur la manière dont se déroule une expérience en IRM.

Cette étude aura lieu au Centre d'Imagerie Cérébrale et de Recherche en Neurosciences (CYCERON).

### **Qu'est-ce que CYCERON ?**

CYCERON est un Groupement d'Intérêt Public, c'est-à-dire un établissement auquel des organismes confient des missions. Vous pouvez trouver le détail de ces organismes en dernière page de ce livret. CYCERON est ainsi un centre d'imagerie au sein duquel sont menées, depuis 1985, des recherches biomédicales dans le domaine des sciences du cerveau (les neurosciences). Il s'agit de faire avancer les connaissances sur le cerveau humain normal, son développement (de l'enfance au vieillissement) mais également lorsque se développent des maladies telles que la maladie d'Alzheimer, la schizophrénie, etc. (ce qui n'est pas le sujet de cette étude APEX sur les enfants dits « sains », ou non malades, avec un développement normal).

CYCERON héberge sur 6000m<sup>2</sup> un ensemble unique de laboratoires et d'instruments, dont l'appareil IRM dans lequel votre enfant sera installé. Cet appareil est très sophistiqué et est entièrement dédié à la recherche sur le cerveau. Le cadre a été spécialement adapté et décoré pour les enfants.

## A PROPOS DE L'IRM

---

### Qu'est-ce que l'IRM ?

IRM est l'abréviation d' « Imagerie par Résonance Magnétique ». Le terme « Imagerie » indique que l'appareil permet de réaliser des images, notamment du cerveau. Le terme « Résonance » indique que cet appareil utilise des ondes radio pour faire « vibrer » les nombreux noyaux d'hydrogène composant les tissus du corps humain. Enfin, le terme « Magnétique » indique que l'appareil est constitué d'un gros aimant.

CYCERON dispose d'un appareil IRM 3 Tesla, de la société Philips :



### Quelles sont les contre-indications à l'IRM ?

Le champ magnétique autour de l'IRM est présent en permanence et attire tous les objets métalliques vers l'appareil.

Les personnes porteuses de pacemaker, d'un Holter, de neuro-stimulateurs, de clips chirurgicaux, de valves, de prothèses métalliques ou auditives, d'agrafes, ou de tout corps étranger susceptible de réagir face au champ magnétique ne peuvent pas passer d'examen IRM. De la même façon, il n'est pas possible de s'approcher de l'appareil avec des objets métalliques (pièces, bijoux/piercing, lunettes à montures métalliques) ou magnétiques (carte bancaire, tickets de transport, clés de voiture) qu'on utilise au quotidien. Ces objets doivent impérativement être enlevés avant d'entrer dans la salle IRM. En fonction du type de matériel avec lequel ils sont faits, les appareils dentaires peuvent être admis pour un examen IRM.

## Quels sont les risques encourus ?

C'est un examen médical totalement indolore, c'est-à-dire sans douleur. Les seuls désagréments au cours de la passation d'une IRM sont liés d'une part au bruit répétitif et intense à l'intérieur de l'appareil lorsque les images du cerveau sont acquises, et d'autre part à la consigne d'immobilité qui est donnée au préalable. C'est pourquoi un casque de protection antibruit est utilisé pour passer l'examen. De la même façon, un temps de pause peut être aménagé pour alléger les contraintes liées à l'immobilité.

Enfin, les études menées depuis 1995 en IRM n'ont à ce jour montré aucun effet secondaire connu suite à la passation d'un tel examen.

## L'EXAMEN IRM DANS L'ÉTUDE APEX

---

Votre enfant portera un vêtement adapté fourni par CYCERON et sera allongé sur le lit mobile, la tête confortablement placée au centre d'une antenne qui s'apparente à un casque. Ses oreilles seront protégées du bruit grâce à un casque antibruit. Un miroir placé au-dessus de ses yeux lui permettra de voir à la fois le médecin situé dans la salle d'enregistrement et les petits exercices qui lui seront proposés. Une fois votre enfant installé confortablement, le lit glissera lentement jusqu'au centre de l'appareil, où votre enfant restera allongé pendant l'examen (2 x 20-25 minutes). Il pourra communiquer avec le médecin grâce à un microphone intégré à l'antenne et entendra ce qu'on lui dit grâce à un petit haut-parleur intégré aussi. De la même manière, le médecin pourra entendre votre enfant grâce au microphone placé en salle d'enregistrement.

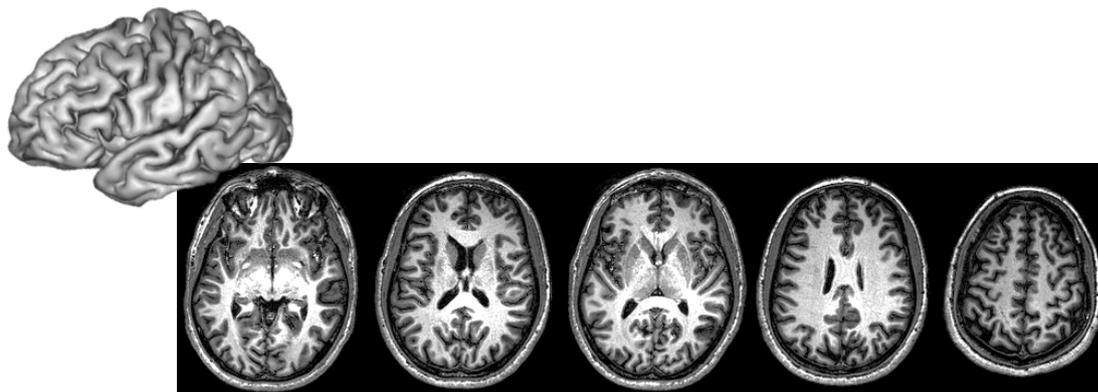


Des séquences d'IRM différentes, produisant des bruits différents, seront effectuées. En effet, selon les séquences d'enregistrement lors de l'examen, le même appareil IRM permet d'obtenir des images soit anatomiques, soit fonctionnelles, du cerveau.

Beaucoup d'examens ont déjà pu être obtenus ainsi dans de très bonnes conditions avec des enfants à Cyceron (dès la maternelle).

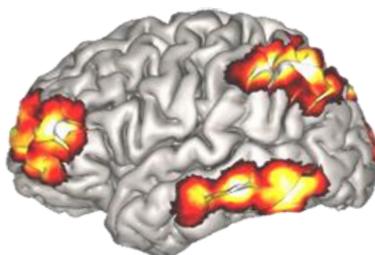
### **Qu'est-ce que l'IRM anatomique ?**

C'est une technique médicale qui permet d'obtenir des images de très haute qualité, avec un haut niveau de détail. En ce qui concerne l'étude à laquelle votre enfant va participer, l'IRM anatomique va permettre de réaliser des images donnant des renseignements sur l'anatomie de son cerveau : comment est répartie la matière grise (le cortex) et à quoi ressemblent les plis qui le sillonnent.



### **Qu'est-ce que l'IRM fonctionnelle ?**

Le mot « fonctionnelle » désigne le fait que les images obtenues nous renseignent sur comment le cerveau fonctionne. Ces images seront obtenues lorsque votre enfant devra faire des petits exercices et réfléchir dans l'appareil IRM. Grâce aux images enregistrées, nous pourrions voir les régions du cerveau qui s'activent lorsqu'il réfléchit, comme ceci :



### **Quels avantages votre enfant et vous-mêmes tirerez de l'étude ?**

Aucun bénéfice direct ne pourra être retiré de l'étude, mais sa participation fera progresser les découvertes sur le cerveau en développement, tant pour la science que la pédagogie à l'école. A titre symbolique, votre enfant recevra un petit cadeau éducatif et un diplôme du LaPsyDÉ pour le remercier de sa participation.

En revanche, en acceptant de faire participer votre enfant, vous contribuerez grandement à améliorer nos connaissances sur le développement du cerveau humain. Dans le cas présent, le but scientifique est de mieux comprendre le développement des capacités d'apprentissage après un entraînement quotidien sur tablette tactile. De façon générale, ce type de recherche biomédicale en sciences cognitives est important pour la connaissance du cerveau en développement, l'adaptation de la pédagogie à l'école et l'usage nouveau des tablettes tactiles (ou autres technologies numériques) tant à la maison qu'à l'école. Grâce à cette étude, vous et votre enfant participerez donc activement aux efforts déployés pour faire avancer le progrès en neurosciences cognitives de l'éducation.

## LE DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

---

### Le premier contact

Si vous souhaitez poursuivre et participer à cette étude, vous trouverez les coordonnées des personnes à contacter, Mmes Katell Mevel et Lisa Delalande, sur la première page de ce livret. Pour tout contact par Email, merci d'indiquer « Projet APEX » en objet. Ensemble, vous planifierez votre visite d'étude à CYCERON.

### La première visite à CYCERON : l'entretien avec un médecin

Lors de cette visite, vous rencontrerez obligatoirement un médecin. Ce médecin vous rappellera les dispositions relatives à la recherche biomédicale, qui vous ont déjà été exposées dans la lettre d'information que vous aurez reçue avant de venir. Il vous posera quelques questions d'ordre médical relatives à votre enfant et, surtout, il vérifiera que votre enfant et vous-même, si vous souhaitez l'accompagner dans la salle, ne présentez pas de contre-indications à l'IRM (vérifications médicales d'usage qui seront faites avant chaque examen IRM de l'étude). Enfin, vous signerez la feuille indiquant que vous donnez votre consentement libre et éclairé au déroulement de l'ensemble de l'étude. Votre enfant donnera lui aussi son accord écrit dans le livret spécialement conçu pour lui et qu'il aura reçu au préalable. Le médecin vous proposera aussi, si vous en êtes d'accord (consentement additionnel signé), une mesure génétique – par un rapide petit prélèvement de salive – qui sera réalisée sur votre enfant lors de cette première visite à Cyceron et qui sera très utile pour mieux comprendre comment fonctionne son cerveau.



L'objectif de la recherche à laquelle votre enfant va participer vous sera expliqué dans la mesure où cette information peut être fournie sans occasionner de biais pour le bon déroulement de l'étude. Des informations complémentaires vous seront données à la fin de votre participation au projet. Pensez à signaler toute prise de médicaments au médecin, que celle-ci soit régulière ou intervienne juste avant la session. L'activité cérébrale de votre enfant peut s'en trouver modifiée et il est important que nous le sachions.

## La visite à CYCERON : l'entraînement

Une courte session d'entraînement sera proposée à votre enfant afin qu'il comprenne bien ce qu'il devra faire dans l'IRM. Pour obtenir de bonnes images, votre enfant devra garder sa tête immobile : l'appareil IRM est très sensible aux mouvements et même un petit écart peut donner des images floues. Un chercheur lui montrera donc comment ne pas bouger.

Une fois cette notion acquise, votre enfant devra également se familiariser avec les petits exercices qui lui seront proposés pendant l'IRM fonctionnelle. Il effectuera donc un entraînement sur ordinateur, dans les mêmes conditions que celles de l'IRM (boîtier de réponse manuelle, etc).

Enfin, votre enfant pourra écouter les bruits de l'IRM pré-enregistrés pour s'habituer à leur différentes variantes.

## Les visites IRM à CYCERON : l'acquisition des images anatomiques et fonctionnelles



Il n'est pas nécessaire d'être à jeun pour l'examen mais pour son confort, essayer de contrôler sa consommation de boisson avant la séance : il devra rester 2 x 20-25 minutes dans l'appareil IRM, sans bouger. Des toilettes seront à sa disposition avant de commencer et une pause sera toutefois aménagée pour lui après l'examen anatomique s'il en ressent le besoin.

Si vous le souhaitez, il vous sera possible de voir les images du cerveau de votre enfant sur écran. Sur la feuille de consentement que vous aurez signée, il sera spécifié que vous acceptez que vous soit communiqué le constat d'éventuelles anomalies au cours de l'examen IRM. En cas de dépistage d'anomalies, vous en serez donc informés et serez dirigés vers votre médecin de famille ou le service compétent du CHU.

Acquisition anatomique: Votre enfant aura pour seule instruction de maintenir sa tête immobile durant environ 20 à 25 minutes, au cours desquelles il pourra regarder un film s'il le souhaite.

Acquisitions fonctionnelles: Après l'acquisition anatomique, le film sera arrêté et des exercices simples seront réalisés par votre enfant pendant environ 20 à 25 minutes. Pour chacune de ces tâches, la consigne sera répétée avant de commencer. Votre enfant verra des figures visuelles ou des phrases s'afficher sur le miroir devant lui et devra répondre manuellement avec le boîtier qu'il aura entre les mains (uniquement deux choix de réponse). Ces exercices permettront de voir comment le cerveau travaille en fonction des tâches proposées.

Dans l'étude APEX, il y aura ainsi 2 visites d'examens IRM à Cyceron (sur 1 mois).

## Le recueil de données comportementales

L'acquisition de données comportementales, par des tests cognitifs sur papier ou ordinateur, sera faite à la suite de l'examen IRM (immédiatement ou dans les jours qui suivent, selon l'organisation) à Cyceron ou à l'école de votre enfant. Celui-ci pourra faire une pause pour se rhabiller et se détendre avant d'être pris en charge par un chercheur. Lors de cette session, votre enfant effectuera une série de jeux-questions sous forme d'exercices, verbaux ou visuels, pendant environ 1H30 (séance décomposable en sessions plus courtes de 45 ou 30 minutes selon sa fatigue et sa motivation que nous respecterons avec soin). L'ensemble de la séance inclura l'explication des tâches à votre enfant et le recueil des données (ses réponses). Elle se déroulera de manière individuelle dans une salle prévue à cet effet.

Pour l'explication simple des deux « visites IRM » à Cyceron et la séquence du projet, voir le livret pédagogique remis à votre enfant à l'école, pages 8 et 9.



Le but de ces mesures comportementales n'est pas d'évaluer votre enfant mais de les mettre en rapport avec les images IRM, à des fins scientifiques générales.

## COMMENT SE RENDRE À CYCERON ?

Le centre se trouve sur le même campus que le GANIL et CIRIL, c'est-à-dire le campus Jules Horowitz situé Boulevard Henri Becquerel à Caen.



### En tramway et en bus :

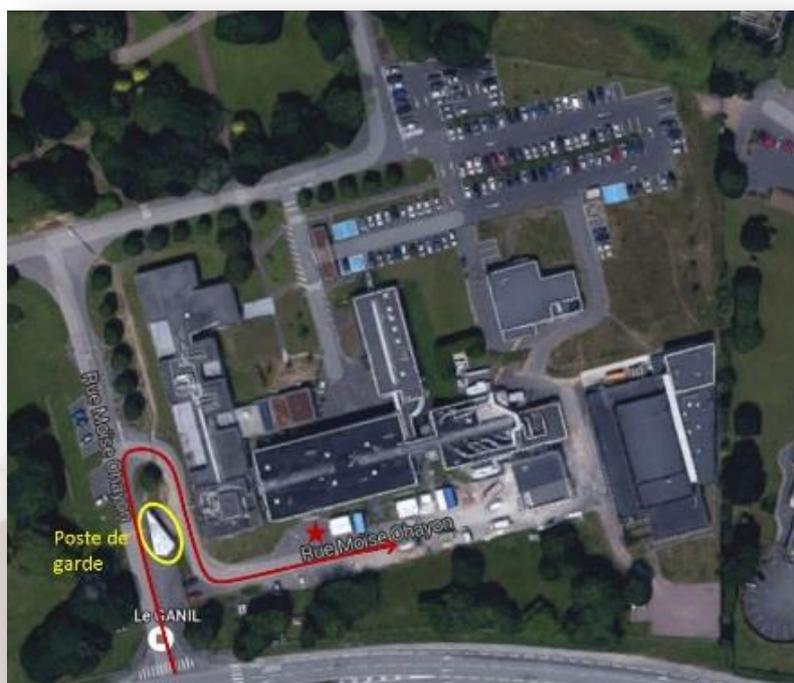
Prendre le tramway A direction Campus 2 et descendre à l'arrêt Citis. Les bus n°8 (arrêt Citis), 14 (arrêt Cifac) et le Campus Express (arrêt Côte de Nacre ou Citis) passent également près de CYCERON.

### En voiture :

Si vous venez de l'extérieur de Caen, prenez la sortie n°5 du périphérique Nord « Côte de Nacre ». Si vous venez du centre-ville, prenez l'Avenue Côte de Nacre direction Douvres la Délivrande. Au centre commercial, tournez à droite sur le Boulevard Henri Becquerel puis à gauche au premier feu tricolore.

A l'entrée du campus, présentez-vous au poste de garde. Les gardiens auront été avertis de votre venue. Vous pourrez ainsi passer les barrières de sécurité et vous garer sur le parking si besoin est. Présentez-vous ensuite à l'entrée du centre (voir étoile rouge) où la secrétaire de l'accueil nous préviendra de votre arrivée.

### En bus ou tramway



### En voiture

## **ASPECTS ÉTHIQUES DE CETTE RECHERCHE**

Ce protocole de recherche a reçu l'accord du Comité de Protection des Personnes Nord Ouest III dans le cadre de la loi Sérusclat-Huriet (N° ID RCB 2015-A00383-46) et bénéficie d'une collaboration longue de 15 ans avec les écoles de Caen et sa région, reposant sur une convention avec l'Inspection d'Académie.

L'acquisition des données est totalement anonyme et protégée par la confidentialité. Les résultats individuels seront analysés anonymement par les chercheurs et ne seront communiqués qu'aux quelques collaborateurs mentionnés sur le document validé par le Comité de Protection des Personnes Nord Ouest III. Si vous êtes intéressés par les résultats globaux de cette étude, un membre de l'équipe sera ravi de vous les montrer. Néanmoins, soyez patient, le traitement des données prendra plusieurs mois.

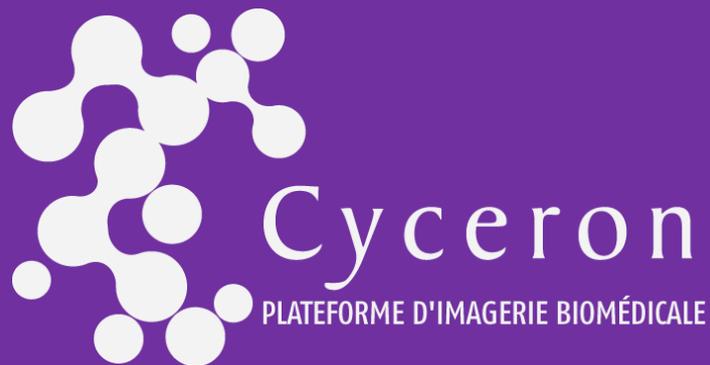
**Nous rappelons que votre enfant et vous-même pouvez décider d'interrompre à tout instant cette étude, même après avoir donné**

MERCI encore de l'intérêt que vous portez à nos travaux de recherche. Si vous avez des questions à poser, n'hésitez pas à nous contacter.

**Katell MEVEL ou Lisa DELALANDE**

Email: [mevel@cyceron.fr](mailto:mevel@cyceron.fr) ou [delalande@cyceron.fr](mailto:delalande@cyceron.fr)

Tél: 02.31.47.01.44



GIP Cyceron

Boulevard Henri Becquerel BP 5229

F – 14074 Caen Cedex

Téléphone : 02 31 47 02 00

Fax : 02 31 47 02 22

Site Internet : <http://www.cyceron.fr>

Groupement d'Intérêt Public

CEA, CNRS, Inserm,

Université de Caen Normandie, CHU de Caen, GANIL,

Centre de Lutte Contre le Cancer François Baclesse,

Communauté d'agglomération Caen la Mer, Région Basse-Normandie



**Annexe n°3** : Exemple de consentement éclairé destiné aux familles volontaires.



**DOCUMENT D'INFORMATION DES RESPONSABLES LEGAUX DU PARTICIPANT MINEUR  
(PARENTS / TUTEURS) POUR L'ETUDE PRINCIPALE**

Madame, Monsieur,

Le Pr Olivier Houdé, Directeur du Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS), vous propose de participer à une recherche biomédicale intitulée :

**« APprentissages EXécutifs et cerveau chez les enfants d'âge scolaire »**  
**(APEX)**

**Le promoteur** est le CHU de Caen, Avenue de la Côte de Nacre – 14033 CAEN, téléphone : 02.31.06.54.73.

**L'investigateur coordinateur** de l'étude est le Pr Bernard Guillois, Service de Néonatalogie au CHU de Caen, Avenue de la Côte de Nacre – 14033 CAEN, téléphone : 02.31.25.27.64.

L'étude clinique est référencée sous le numéro **ID RCB n°2015-A00383-46**.

Le promoteur de l'étude a souscrit une **assurance** pour ce protocole de recherche : Responsabilité civile pour les recherches biomédicales (police n° 131.664) auprès de la société SHAM, Société Hospitalière d'Assurances Mutuelles, située 18 rue Edouard Rochet – 69372 LYON cedex 08, téléphone : 04.72.75.50.25 (selon le code de la Santé Publique – Titre II du livre premier relatif aux recherches biomédicales).

Ce document d'information a pour but de vous expliquer exactement ce que cette étude implique afin de vous permettre de décider si vous voulez que votre enfant y participe.

Avant de prendre une décision, il est important que vous lisiez attentivement ces pages qui vous apporteront les informations nécessaires concernant les différents aspects de cette recherche.

Si vous souhaitez que votre enfant participe, le médecin discutera avec vous tout point qui ne vous semblerait pas clair et répondra à vos questions lors de votre visite au centre Cyceron. N'hésitez pas à l'interroger afin d'obtenir plus de détails.

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

## I. Informations Générales

### **Objectif général de cette étude**

L'objectif de cette étude est d'évaluer, au moyen de l'imagerie cérébrale, l'impact respectif de différents types d'apprentissage sur la structure et le fonctionnement du cerveau chez des enfants volontaires sains d'âge scolaire (9-10 ans), nés à terme ou très prématurément.

### **Contexte**

De nouvelles technologies comme l'Imagerie par Résonance Magnétique (ou IRM) permettent aujourd'hui d'étudier de manière non invasive et répétée les processus d'apprentissage cognitif dans le cerveau des enfants. En France, notamment, des progrès importants ont déjà été faits ces dernières années pour la lecture et le calcul. Un autre domaine d'une forte actualité scientifique est celui du développement du contrôle cognitif ou « exécutif », c'est-à-dire des fonctions supérieures du cerveau, en particulier du cortex préfrontal, qui permettent le choix (par activation ou inhibition) de la bonne stratégie cognitive au bon moment. Ces fonctions de contrôle de soi, importantes à l'école comme dans la vie, connaissent une maturation tardive et, tout en étant sous contrôle génétique, sont susceptibles de s'améliorer par l'effet d'interventions pédagogiques à l'école, dans des jeux sur écrans, etc.

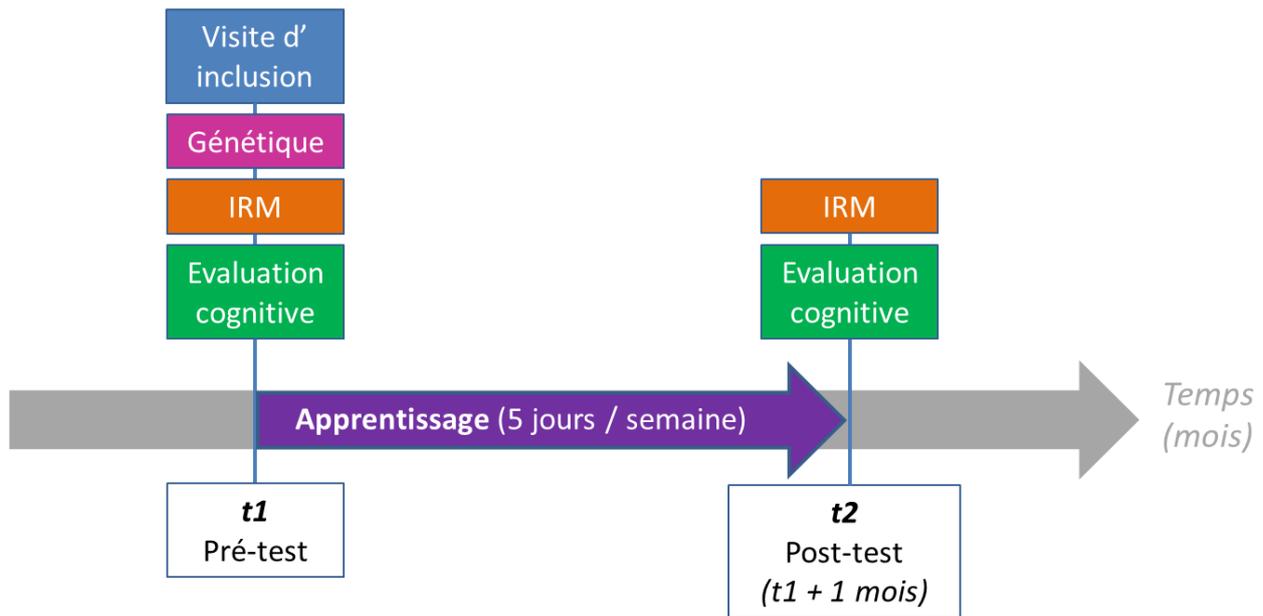
C'est pourquoi il vous est proposé de faire participer votre enfant à une étude qui vise à évaluer la possibilité qu'un apprentissage exécutif intensif (sur un mois) puisse modifier la structuration et le fonctionnement du cerveau et ainsi améliorer le contrôle exécutif des enfants, avec ou sans difficulté scolaire ou autre particulière.

### **Procédure à suivre**

Votre enfant suivra des séances d'apprentissage de 15 min par jour, 5 jours par semaine, pendant un mois, à l'école ou à la maison, sur une tablette numérique tactile qui lui sera fournie. Il participera également à 2 examens IRM (d'environ 45 min chacun) sur un intervalle de 1 mois au centre Cyceron et à 2 sessions de tests comportementaux et cognitifs (d'environ 1h30 chacune, effectuées quelques jours après chaque IRM) qui pourront avoir lieu à Cyceron ou à l'école de votre enfant. L'apprentissage sur tablette tactile sera réalisé entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> examen IRM. Votre enfant recevra un planning personnalisé précisant les dates des examens IRM et des tests

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

comportementaux, ainsi que le programme des séances d'apprentissage sur tablette numérique qu'il devra réaliser à distance.



*Planning de la participation de votre enfant.*

## Imagerie cérébrale

La participation de votre enfant à cette étude nécessitera votre venue et celle de votre enfant au centre Cyceron pour une première visite incluant l'accueil, l'entretien avec le médecin, l'explication des consignes à suivre pour l'IRM et l'apprentissage, la mise en place et l'enregistrement IRM. Lors de votre visite, le médecin vous recevra avec votre enfant dans un premier temps pour vérifier que celui-ci ne présente pas de contre-indications médicales à un examen d'IRM, pour vous expliquer le but de cette recherche et vous proposer de signer la feuille de consentement, après s'être bien assuré que votre enfant donne aussi son plein accord pour participer à cette étude (il est invité à le faire par écrit à la fin de son livret d'information).

Si vous désirez accompagner votre enfant dans la salle d'IRM le jour de l'examen, le médecin vérifiera également que vous ne présentez pas de contre-indications médicales à l'entrée dans la « zone IRM ». Compte tenu de la présence d'un aimant de forte puissance dans l'IRM, les contre-indications, pour vous comme pour votre enfant, sont le port de tout type d'implants métalliques : stimulateur cardiaque, clips (notamment neurochirurgicaux ou thoraciques), prothèses métalliques ou incluant une minuterie électronique (prothèse auditive, prothèse articulaire, matériel d'ostéosynthèse, matériel d'orthodontie paramagnétique, sutures à fils métalliques, agrafes). De

**Paraphes** (Personne(s) donnant le consentement et investigateur)

plus, aucun objet métallique ou magnétique ne peut être entré dans la salle d'IRM (clé, ceinture, montre, piercing, carte de crédit, etc.). Pour bien s'assurer de l'absence de tels objets sur soi et tout particulièrement dans les poches des vêtements, votre enfant (et éventuellement vous-même si vous l'accompagnez) sera invité à se mettre en tenue adaptée dans une cabine prévue à cet effet et jouxtant la salle IRM – des toilettes se trouvent aussi à proximité.

*A tout moment, vous et votre enfant aurez le loisir de poser toutes les questions que vous souhaitez.*

Pendant l'examen d'IRM, votre enfant sera installé confortablement dans l'appareil, avec un casque anti-bruit afin d'atténuer le volume sonore produit par la machine. Il sera allongé sur un lit dans un tunnel d'environ 60 cm de large. Un système de communication audio-visuelle (Cinemavision) lui permettra d'entendre et de voir le médecin situé dans la salle de contrôle et d'enregistrement juste en face de la machine. Le médecin pourra entendre votre enfant et les personnes présentes (un membre de l'équipe et (ou) vous-même si besoin est) dans la salle d'IRM grâce à un microphone situé dans la machine. Votre enfant pourra communiquer quand il le souhaite avec le médecin et l'équipe. L'examen durera environ 45 minutes avec la possibilité de faire une pause.

*Malgré la présence dans la salle d'IRM d'un membre de l'équipe et (ou) de vous-même si votre enfant le souhaite, et d'une ambiance lumineuse apaisante, votre enfant pourra à tout moment et à sa demande être sorti du tunnel, par exemple s'il manifeste des signes de claustrophobie.*

Une première partie de l'examen IRM consistera à enregistrer des mesures anatomiques, c'est-à-dire la structure du cerveau de votre enfant. Celui-ci aura pour seule instruction de maintenir sa tête immobile. Il pourra voir, s'il le souhaite, un film qui lui sera présenté (via des lunettes d'immersion vidéo) pour le faire patienter durant cette acquisition d'images anatomiques. Le médecin regardera, immédiatement après l'acquisition, les images et vous informera si une anomalie éventuelle est constatée, bien que cet examen IRM destiné à la recherche ne soit pas à visée clinique et diagnostique.

Dans une seconde partie de l'examen, on enregistrera également le fonctionnement du cerveau de votre enfant pendant qu'il réalise deux tâches simples en répondant avec une manette à des stimulations visuelles pour identifier les régions cérébrales impliquées. Pour une bonne analyse des images, là encore l'immobilité de la tête est indispensable.

**Paraphes** (Personne(s) donnant le consentement et investigateur)

Comme indiqué ci-dessus, l'ensemble de l'examen durera environ 45 minutes, mais votre enfant pourra faire une pause et bouger entre les deux parties (anatomie et fonctionnement) de l'examen s'il le souhaite.

L'examen d'IRM est totalement indolore. Les seuls désagréments possibles sont liés au bruit répétitif et intense à l'intérieur de l'appareil lors de l'acquisition des images. C'est pourquoi votre enfant portera un casque anti-bruit spécialement adapté aux passations IRM. A ce jour, toutes les études menées depuis 1995 n'ont montré aucun effet secondaire connu suite à la passation d'une IRM chez l'Homme.

Cette procédure se répètera pour chacun des 2 examens IRM et sera suivie quelques jours après d'un entretien avec votre enfant pour évaluer certaines de ses capacités cognitives.

### Evaluation cognitive

Des petits exercices complémentaires seront proposés à votre enfant dans les jours suivant l'IRM. Cet entretien d'environ 1h30 sera aménagé avec des pauses selon la vigilance de votre enfant et se déroulera dans une salle adaptée soit au centre Cyceron, soit au sein de son école. Cette session consistera en une caractérisation du profil de votre enfant à propos de ses capacités cognitives.

Il n'existe aucun désagrément lié à cette évaluation cognitive, si ce n'est la contrainte pour votre enfant de rester concentré afin d'effectuer au mieux les exercices proposés – ce que tous les enfants scolarisés ont l'habitude de faire.

La participation à cette étude ne consiste pas du tout en une évaluation comparative et normative des plus ou moins bons élèves, mais en une simple exploration – *pour la recherche* – des mécanismes du développement cognitif, en relation avec les données d'IRM du cerveau que nous recueillerons en parallèle. Tous les résultats individuels seront consignés de façon anonyme et ne seront pas communiqués à l'école ou à l'Inspection d'Académie. Ils seront utilisés aux fins exclusives de la recherche scientifique. Seuls les résultats globaux et anonymes de l'étude seront communiqués – sachant que le traitement statistique des données peut prendre plusieurs mois.

### Apprentissage sur tablette

Lors de sa première visite au centre Cyceron (premier examen IRM), votre enfant recevra, sous votre responsabilité qui consistera à surveiller que votre enfant utilise avec soin et seulement pour l'usage prévu, une tablette numérique tactile sur laquelle sera installé le programme

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

d'apprentissage, assorti des instructions précises pour réaliser de façon ludique l'entraînement quotidien. Une démonstration lui sera faite par un chercheur de l'équipe, suivie d'un exercice de familiarisation, afin de vérifier que les consignes ont été bien comprises et que votre enfant maîtrise l'utilisation de la tablette pour cet exercice, qui lui apparaîtra comme un jeu éducatif.

Un carnet de bord précisant les dates de chacune des séances d'apprentissage, un rappel des consignes de la tâche à effectuer, une notice d'utilisation du programme qui permet d'effectuer l'apprentissage, le bouton sur lequel appuyer à la fin de chaque séance pour transmettre à distance l'ensemble des données relatives à cette séance à l'expérimentateur en charge du suivi de votre enfant et, enfin, les coordonnées de l'expérimentateur (pour appel si besoin) vous sera remis. Ce carnet de bord devra également être complété par votre enfant de façon active et régulière : il devra indiquer la date, l'heure et le lieu de chaque séance effectuée, le nombre de points qu'il a gagnés et ses remarques sur la séance.

Un petit programme de visioconférence (type Skype) sera installé sur chaque tablette pour qu'en cas de problème technique votre enfant puisse communiquer (dans les 24h) avec l'expérimentateur en charge du suivi de son apprentissage.

Cet apprentissage se déroulera durant le mois compris entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> examen IRM (voir le schéma p.3), au rythme de 15 min par jour, 5 jours par semaine.

### ***Réalisation de l'essai***

Au total, 150 enfants seront inclus dans cette étude grâce à la collaboration avec le Rectorat de l'Académie du Calvados et notre réseau d'écoles primaires partenaires, ainsi que le Service de Néonatalogie du CHU de Caen.

Vous aurez une personne référente que vous pourrez contacter pendant toute la durée de l'étude et qui prendra contact avec votre enfant de façon hebdomadaire durant le mois d'apprentissage.

Avant tout examen et pour vérifier que votre enfant correspond aux critères de sélection de l'étude vous réaliserez un entretien avec un médecin investigateur de l'étude (au centre Cyceron).

### ***Durée de participation***

La durée de participation de votre enfant à cette étude est de 1 mois à partir du recueil du consentement.

### ***Paraphes (Personne(s) donnant le consentement et investigateur)***

## ***Affiliation à un régime d'assurance maladie et examen médical préalable***

Dans le cadre de la participation de votre enfant à cette recherche biomédicale, nous vous informons que vous avez l'obligation d'être affilié à ou de bénéficier d'un régime d'assurance maladie et que votre enfant bénéficiera d'un entretien médical, préalable et obligatoire à toute recherche, avec un médecin investigateur de l'étude.

## ***Période d'exclusion et indemnité compensatrice***

Il n'y a pas de période d'exclusion particulière suite à cette étude. L'enfant pourra participer à une autre étude dès la 2<sup>ème</sup> session (IRM et tests comportementaux) réalisée.

Un cadeau éducatif sera donné à l'enfant à la fin de l'étude pour le remercier de sa participation.

## ***Inscription au fichier National***

Nous vous informons que le NOM de votre enfant sera inscrit dans le fichier national des personnes qui se prêtent à des recherches biomédicales prévu à l'article L.1121-16 du code de la santé publique. Vous avez la possibilité de vérifier auprès du ministre chargé de la santé l'exactitude des données le concernant présentes dans ce fichier et la destruction de ces données au terme du délai prévu par le code de la santé publique (12 mois).

## ***Risques prévisibles et effets secondaires associés à cette étude***

Toutes les études menées depuis 1995 n'ont montré aucun effet secondaire connu suite à la passation d'une IRM chez l'Homme. C'est un examen totalement indolore. Les seuls désagréments possibles au cours de la passation d'une IRM sont liés au bruit répétitif et intense à l'intérieur de l'appareil lors de l'acquisition des images. Étant particulièrement attentifs au confort des participants, un casque anti-bruit protégera leurs oreilles et le temps d'examen sera relativement court (environ 45 minutes découpées en plusieurs sessions et avec la possibilité de faire une pause si votre enfant le souhaite). Par ailleurs, une familiarisation au bruit de l'IRM sera faite préalablement afin de préparer votre enfant au type de sonorité produit par l'appareil IRM.

La seule contrainte de cette étude est de respecter le calendrier imposé (voir le schéma page 3) qui se déroulera ainsi :

1. Examen IRM et tests comportementaux avant l'apprentissage,

## ***Paraphes (Personne(s) donnant le consentement et investigateur)***

2. Apprentissage quotidien (5 jours par semaine) de 15 min sur tablette numérique tactile pendant un mois, à la maison ou à l'école,
3. Examen IRM et tests comportementaux juste après l'apprentissage,

## **Bénéfices attendus**

Il s'agit d'une étude dont les participants ne tireront aucun bénéfice personnel et/ou financier direct. Cependant, un cadeau éducatif sera offert à l'enfant pour le remercier de sa participation.

A terme, les résultats scientifiques obtenus permettront de mieux comprendre les effets des apprentissages exécutifs sur le cerveau des enfants d'âge scolaire et ouvriront de nouvelles perspectives pour des interventions pédagogiques ciblées sur le contrôle exécutif, susceptibles d'aider au mieux les enfants à surmonter des difficultés d'ordre cognitif et scolaire.

## II. Participation

La participation de votre enfant à ce projet de recherche est volontaire. Vous, ainsi que votre enfant, avez le droit de refuser de participer à cette recherche sans avoir à vous justifier, ou d'arrêter la participation de votre enfant à tout moment en cours d'étude sans aucun préjudice pour vous et votre enfant. En cas de doute ou de besoin d'informations complémentaires sur la participation de votre enfant à ce protocole de recherche, vous avez le droit de questionner à tout moment l'équipe avant, pendant ou après l'étude.

Si vous ne vous présentez pas aux examens prévus ou si vous ne respectez pas les exigences du protocole ou les instructions du médecin, ce dernier pourra décider d'interrompre votre participation à l'étude.

Vous avez bien entendu la possibilité de réfléchir, avant de prendre votre décision ou de refuser sans que cela ne modifie en quoi que ce soit vos relations avec l'investigateur et l'équipe de recherche. Ce document vous appartient et nous vous invitons à en discuter avec votre médecin traitant et vos proches si vous le souhaitez. Vous avez le droit de retirer votre consentement à tout moment sans avoir à vous justifier.

L'investigateur principal vous tiendra informé de toute information nouvelle survenant pendant la participation de votre enfant et pouvant influencer votre décision de participation.

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

Vous, ainsi que votre enfant, serez informés à la fin de l'étude des résultats globaux de la Recherche. Les résultats apportés par cette étude pourront vous être communiqués à l'oral sur simple demande de votre part à l'issue de l'analyse des données obtenues par l'ensemble des participants à cette étude.

Dans cette étude, les données nominatives seront enregistrées, transmises et centralisées au Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant, UMR CNRS 8240. Ces données démographiques, cliniques et biologiques seront analysées par des moyens informatiques, respectant le secret statistique et médical.

L'analyse statistique des données permettra de connaître les effets d'apprentissages intensifs sur le contrôle exécutif, la structure et le fonctionnement du cerveau.

La mise en évidence de relation(s) éventuelle(s) repose sur les méthodes statistiques appropriées. Ces analyses seront effectuées par des chercheurs compétents dans ce domaine.

### III. Aspects légaux

Dans le cadre de la recherche biomédicale à laquelle il est proposé à votre enfant de participer, un traitement de ses données personnelles va être mis en œuvre pour permettre d'analyser les résultats de la recherche au regard de l'objectif de cette dernière qui vous a été présenté.

A cette fin, les données le concernant seront transmises au promoteur de la recherche (CHU de Caen) ou aux personnes ou sociétés agissant pour son compte, en France ou à l'étranger. Ces données seront anonymes, identifiées par un numéro de code. Ces données pourront également, dans des conditions assurant leur confidentialité, être transmises aux autorités sanitaires de santé ou judiciaires.

Conformément aux dispositions de la loi relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés (en conformité avec la loi n° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés), vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des fichiers contenant vos données personnelles. Vous disposez également d'un droit d'opposition à la transmission des données couvertes par le secret professionnel susceptibles d'être utilisées dans le cadre de cette recherche et d'être traitées.

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

Vous pouvez également accéder directement ou par l'intermédiaire d'un médecin de votre choix à l'ensemble des données médicales de votre enfant en application des dispositions de l'article L1111-7 du Code de la Santé Publique. Ces droits s'exercent auprès du médecin qui vous suit dans le cadre de la recherche et qui connaît votre identité.

Conformément à la loi n° 2002-303 du 4 mars 2002 relative aux droits des malades et à la qualité du système de santé, le CHU de Caen vous tiendra informé des résultats globaux de cette Recherche à la fin de l'étude.

Si vous acceptez de faire participer votre enfant à cette étude, nous vous demandons de bien lire attentivement le formulaire de consentement joint et de le signer. Ce consentement ne dégage en rien la responsabilité de l'investigateur et du promoteur. Vous avez la possibilité de poser des questions à tout moment avant et en cours d'étude auprès de :

Pr Olivier Houdé, Tel : 01.40.46.29.95, Courriel : [olivier.houde@parisdescartes.fr](mailto:olivier.houde@parisdescartes.fr)

(en cas d'indisponibilité, vous pouvez contacter l'investigateur principal, le Pr Bernard Guillois, au 02.31.27.25.64, Courriel : [guillois-b@chu-caen.fr](mailto:guillois-b@chu-caen.fr)).

Vous pouvez interrompre à tout moment la participation de votre enfant à l'étude sans que cela ne porte atteinte aux bons soins qui vous sont prodigués, ni à vos relations avec votre médecin. Votre signature ne constitue pas un engagement de votre part, elle sert uniquement à prouver que vous avez été bien informé sur l'étude.

Cette recherche a reçu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP) Nord Ouest III, situé au CHU de Caen, niveau 03 – porte 03-508, avenue de la côte de nacre – 14033 CAEN cedex 05 le 30/06/2015 et l'autorisation de l'autorité compétente (Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des produits de santé : ANSM) le 20/05/2015.

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

**Consentement éclairé pour les parents ou tuteur légal (participants mineurs)**

**FEUILLE DE CONSENTEMENT POUR L'ETUDE PRINCIPALE « APEX »**

Je, soussigné(e) ....., né(e) le ..../..../.....,  
parent ou tuteur légal de l'enfant ....., né(e) le ..../..../.....,  
déclare faire participer volontairement mon enfant à la recherche biomédicale intitulée :

**« APprentissages EXécutifs et cerveau chez les enfants d'âge scolaire » (APEX)**

Ce après avoir été informé(e) des implications engendrées par la participation de mon enfant par un médecin investigateur de cette recherche lors de la visite d'inclusion.

**Le promoteur** est le CHU de Caen, Avenue de la Côte de Nacre – 14033 CAEN, téléphone : 02.31.06.54.73.

**L'investigateur coordinateur** de l'étude est le Pr Bernard Guillois, Chef du Service de Néonatalogie au CHU de Caen, Avenue de la Côte de Nacre – 14033 CAEN, téléphone : 02.31.25.27.64.

L'étude clinique est référencée sous le numéro **ID RCB n°2015-A00383-46**.

Le promoteur de l'étude a souscrit une **assurance** pour ce protocole de recherche : Responsabilité civile pour les recherches biomédicales (police n° 131.664) auprès de la société SHAM, Société Hospitalière d'Assurances Mutuelles, située 18 rue Edouard Rochet – 69372 LYON cedex 08, téléphone : 04.72.75.50.25 (selon le code de la Santé Publique – Titre II du livre premier relatif aux recherches biomédicales).

J'ai reçu et compris les informations reportées dans le document d'information, ci-joint, qui m'a été également remis. J'ai été informé(e) du but, de la nature, de la durée, des bénéfices et des risques prévisibles de l'étude et de ce que l'on attend de mon enfant. Mon enfant a été informé(e) de manière adaptée à son âge, sa maturité et son niveau de compréhension. Nous avons pu poser toutes les questions que nous voulions et avons reçu des réponses adaptées.

J'ai disposé d'un temps de réflexion suffisant entre l'information et le consentement.

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

J'accepte de passer un entretien avec le médecin à propos de mon enfant et de son cadre familial et éducatif. Si je souhaite accompagner mon enfant dans la salle d'IRM, je répondrai aux mêmes questions médicales personnelles que celles le concernant sur les contre-indications relatives aux règles de sécurité.

J'ai bien compris que j'ai le droit de refuser de faire participer mon enfant ou de retirer mon consentement à tout moment sans avoir à me justifier et que ma décision sera sans conséquence sur mes relations futures avec l'investigateur et l'équipe de recherche.

J'accepte de façon libre et volontaire que mon enfant participe à la présente recherche.

Je certifie que mon enfant a été informé(e) et n'a pas exprimé de refus quant à sa participation.

Si moi-même ou mon enfant ne respectons pas les consignes qui nous ont été données pour le bon déroulement de l'étude, j'accepte que la participation de mon enfant soit immédiatement suspendue.

Je sais que je ne peux attendre aucun bénéfice direct pour la santé de mon enfant à l'issue de l'étude à laquelle il va participer (contrairement, par exemple, aux études biomédicales où l'on teste de nouveaux médicaments pour traiter certaines maladies). En outre, j'accepte que le médecin m'informe en cas (rares) d'anomalies anatomiques découvertes lors de l'examen IRM du cerveau de mon enfant – ce qui n'est pas en soi le but de l'étude.

Je suis informé(e) que l'étude peut s'arrêter à tout moment, à l'initiative de l'investigateur coordinateur (Pr Bernard Guillois) ou du promoteur (CHU de Caen).

J'ai compris que les données médicales et psychologiques concernant mon enfant resteront confidentielles et ne pourront être consultées que par l'investigateur et ses collaborateurs ou par des personnes mandatées par le promoteur et astreintes au secret professionnel ou par des personnes mandatées par les autorités sanitaires et judiciaires

J'accepte le traitement informatisé des données nominatives de mon enfant en conformité avec la loi n° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

J'accepte que l'investigateur inscrive le NOM de mon enfant dans le fichier national des Volontaires pour la Recherche Biomédicale (VRB) prévu à l'article L.1121-16 du code de la santé

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

publique. J'ai la possibilité de vérifier auprès du Ministre chargé de la santé l'exactitude des données présentes dans ce fichier (loi du 6 Janvier 1978) et la destruction de ces données au terme du délai prévu par le code de la santé publique (délai de 12 mois).

Je ne peux en aucune circonstance prétendre avoir le droit de limiter l'utilisation qui peut être faite des résultats de cette étude.

En particulier, je suis d'accord pour qu'une partie de ces résultats soit transmise aux autorités de la santé en France ou à l'étranger.

Le présent consentement ne dégage pas le promoteur et les investigateurs de leurs responsabilités.

Je pourrai à tout moment avoir accès aux données de l'étude et le promoteur me tiendra informé(e), ainsi que mon enfant, en fin d'étude des résultats globaux de cette Recherche, selon la loi n° 2002-303 du 4 mars 2002.

Je pourrai exercer mon droit d'accès et de rectification auprès de l'investigateur coordinateur de la recherche, le Pr Bernard Guillois, Service de Néonatalogie au CHU de Caen, téléphone 02.31.25.27.64.

J'ai été informé que conformément au code de la Santé Publique – Titre II du livre premier relatif aux recherche biomédicales, cette recherche a reçu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP) Nord Ouest III, situé au CHU de Caen, niveau 03 – porte 03-508, Avenue de la Côte de Nacre – 14033 CAEN cedex 05 et l'autorisation de l'autorité compétente (ANSM).

Je m'engage à ne pas révéler à un tiers les informations confidentielles qui m'ont été données concernant cette étude.

J'ai été informé que les procédures de cette recherche sont conformes aux recommandations les plus récentes faites en matière d'éthique des recherches biomédicales sur l'Homme dans la déclaration d'Helsinki et dans la Loi n° 2004-806 du 9 août 2004.

Je certifie être le parent ou tuteur légal de mon enfant et être affilié(e) au régime de Sécurité Sociale. Je certifie aussi que je ne suis pas privé(e) de ma liberté, soit légalement, soit administrativement, que je ne suis pas sous tutelle, et qu'il n'y a pas nécessité d'obtenir l'autorisation du conseil de famille ou du juge des tutelles.

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

Je m'engage à être facilement joignable aux coordonnées que j'ai données au médecin durant la totalité de l'étude.

Je signerai ce formulaire de consentement après l'avoir lu et après avoir parfaitement compris le document d'information fourni.

Je conserverai un exemplaire du document d'information et de ce formulaire de consentement éclairé signé et daté personnellement par les deux parties impliquées (le second exemplaire étant destiné à l'investigateur).

**Signature du médecin** qui atteste avoir pleinement expliqué aux personnes signataires le but, les modalités ainsi que les risques potentiels de la recherche

Nom, prénom : \_\_\_\_\_

Date |\_|\_|||\_|\_|||\_|\_|\_|\_|\_|

**Signature**

**Signature des personnes donnant leur consentement pour l'enfant**

Nom, prénom et date de naissance de l'enfant : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nom, prénom et date de naissance de la mère : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Date |\_|\_|||\_|\_|||\_|\_|\_|\_|\_|

**Signature de la mère** (précédée de la mention « lu, compris et approuvé »)

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)

Nom, prénom et date de naissance du père : \_\_\_\_\_

Date |\_|\_|||\_|\_|||\_|\_|\_|\_|\_|

**Signature du père** (précédée de la  
mention « lu, compris et approuvé »)

Lieu

**Paraphes** (*Personne(s) donnant le consentement et investigateur*)



**Annexe n°4** : Listing complet des critères d'inclusion et de non-inclusion.



**CENTRE INVESTIGATEUR / PARTICIPANT**

Nom INVESTIGATEUR

|\_|\_|\_|

Nom (3 premières lettres) Prénom (2 premières lettres)

|\_|\_|

Date de naissance : |\_|\_| |\_|\_| |\_|\_|  
J J M M A A

Date d'inclusion : |\_|\_| |\_|\_| |\_|\_|

**CRITERES D'INCLUSION pour enfants nés à terme**

1. Agé de 9-10 ans (inclusifs).....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	
2. Ayant effectué une scolarité en langue française depuis le CP .....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	
3. De préférence manuelle droite .....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	
4. Examens médical, neurologique et neuroradiologique normaux .....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	
5. Grossesse normale menée à terme ( <b>≥ 37 SA</b> ) .....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	
6. Consentement éclairé et signé des responsables légaux informés .....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	
7. Consentement écrit de l'enfant informé .....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	
8. Responsable légal affilié à un régime de sécurité social .....	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="radio"/> Non	

**CRITERES DE NON-INCLUSION pour enfants nés à terme**

9. Jumeaux monozygotes .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
10. Contre-indication à un examen IRM .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
11. Troubles cognitifs de survenue brutale, antécédent de traumatisme crânien avec perte de connaissance de plus d'1h ou encéphalite .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
12. Trouble envahissant du développement et/ou des acquisitions .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
13. Infirmité motrice cérébrale .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
14. Trouble de la motricité fine .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
15. Antécédents de maladie majeur (diabète, maladie pulmonaire chronique, désordre cardiaque, métabolique, hématologique, endocrinologique ou immunologique sévère, cancer) .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
16. Affection chronique neurologique, psychiatrique, endocrinienne, hépatique ou infectieuse	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
17. Prise de médicaments susceptibles d'inférer avec les mesures d'imagerie cérébrale (anxiolytiques, neuroleptiques, benzodiazépines, etc.) .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
18. Daltonisme ou troubles visuels non corrigés .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
19. Impossibilité de se soumettre à l'étude pour des raisons géographiques .....	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	
20. Participant non accompagné par le(s) parent(s) ou le tuteur légal lors de la visite à Cyceron	<input type="radio"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	

*Un seul  coché entraîne la non-inclusion du sujet dans l'étude*

**INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES**

**NUMERO DU PARTICIPANT: |\_|\_|-|\_|\_|\_|**

Dates des inclusions et signature de l'investigateur :

|\_|\_|/|\_|\_|/|\_|\_|\_|\_|

Date de réception et signature de la CPRC :

|\_|\_|/|\_|\_|/|\_|\_|\_|\_|



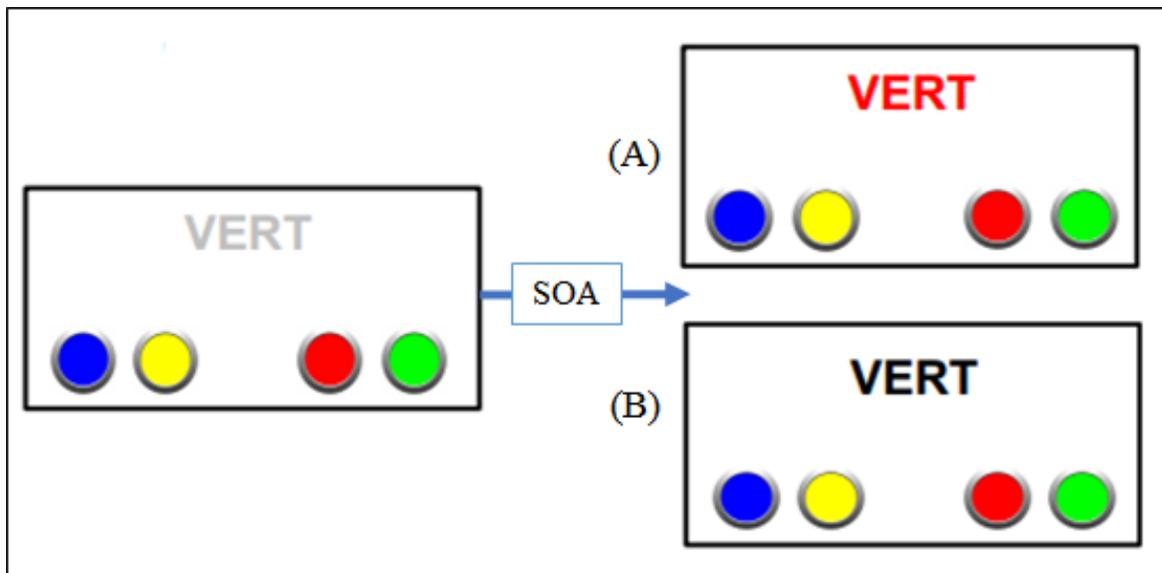
**Annexe n°5 a :** Présentation et exemple de questions présentées aux participants du groupe contrôle inhibiteur (CA).

Dans le dessin animé de Walt Disney, quel plat la belle et le clochard partagent-ils en amoureux ?

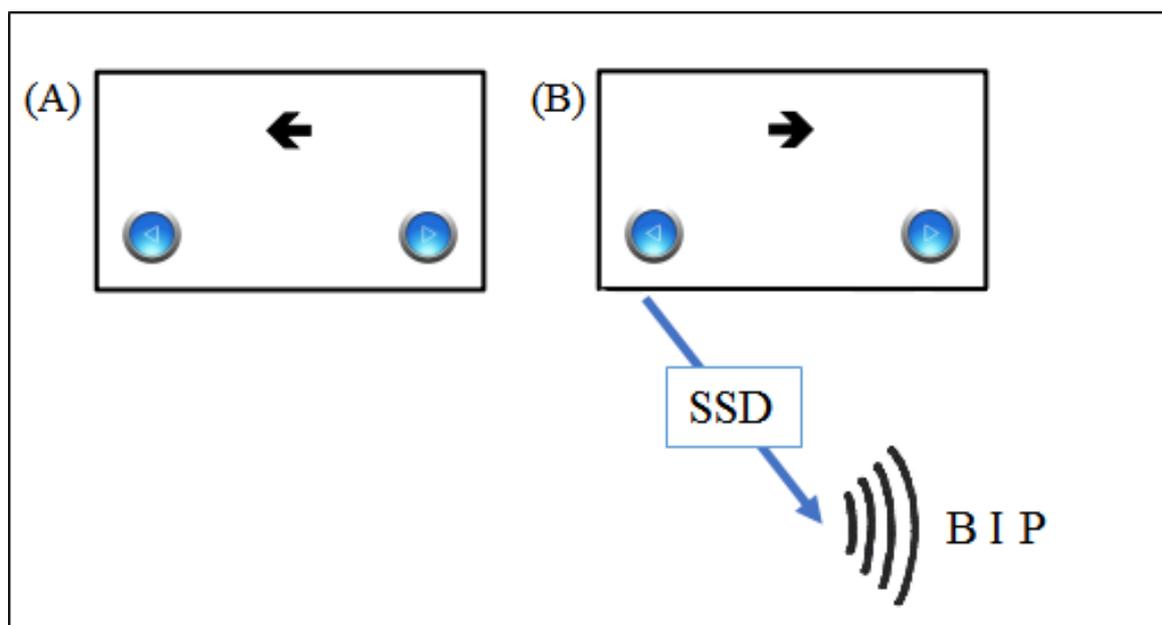
- A Un plat de spaghettis
- B Une pizza
- C Un cassoulet
- D Un gâteau au chocolat



**Annexe n°5 b :** Présentation de la tâche de Stroop entraînée sur la tablette. (A) Essai test incongruent, (B) essai contrôlé.



**Annexe n°5 c :** Présentation de la tâche de stop-signal entraînée sur la tablette. (A) Item go, (B) item stop.





**Annexe n°6 :**

Delalande, L., Moyon, M., Tissier, C., Dorrière, V., Mevel, K., Charron, S., Salvia, E., Poirel, N., Vidal, J., Lion, S., Oppenheim, C., Houdé, O., Cachia, A., et Borst, G. *Complex structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence.* (actuellement en révision dans la revue *Developmental Science*).



# Developmental Science



## Complex structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence

Journal:	<i>Developmental Science</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	Special Issue Article
Keywords:	inhibitory control, training, neuroplasticity, childhood, adolescence
Subject Area:	ERP/Imaging

SCHOLARONE™  
Manuscripts

Copy Only

**Complex structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training  
from childhood to adolescence**

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

Review Copy Only

**RESEARCH HIGHLIGHTS**

- Inhibitory control (IC, i.e., the ability to resist automatism, temptations, distractions, or interference) is a core process of cognitive and socioemotional development.
- We investigated the behavioral and structural changes induced by a 5-week computerized and adaptive IC training in school-aged children (10-year-olds) and in adolescents (16-year-olds).
- Children's but not adolescents' IC efficiency improved from the pre- to the posttraining session in boys but not in girls.
- Similar to the neuroplastic mechanisms during brain maturation, IC training-related changes in cortical thickness and surface area in the prefrontal cortex were age- and gender-specific.

**ABSTRACT**

A number of training interventions have been designed to improve executive functions and inhibitory control (IC) across the lifespan. Surprisingly, no study has investigated the structural neuroplasticity induced by IC training from childhood to late adolescence, a developmental period characterized by improvement of IC efficiency and protracted maturation of prefrontal cortex (PFC) subregions involved in IC. The aim of the present study was to investigate the behavioral and structural changes induced by a 5-week computerized and adaptive IC training in school-aged children (10-year-olds) and in adolescents (16-year-olds). Sixty-four children and 59 adolescents were randomly assigned to an IC (i.e., *Color-Word Stroop* and *Stop-Signal* tasks) or an active control (knowledge- and vocabulary-based tasks) training group. In the pre- and posttraining sessions, participants performed the Color-Word Stroop and Stop-signal tasks, and an anatomical MRI was acquired for each of them. Children's IC efficiency improved from the pre- to the posttraining session more in the IC than in the AC group in boys but not in girls. No improvement in IC efficiency was observed in adolescents. Similar to the neuroplastic mechanisms observed during brain maturation, we observed IC training-related changes in cortical thickness and cortical surface area in several PFC subregions (e.g., the pars opercularis, triangularis, and orbitalis of the inferior frontal gyri) that were age- and gender-specific. Taken together, the results of our study provide the first evidence of the complex structural neuroplastic mechanisms at the root of behavioral changes in IC efficiency from pre- to posttraining in school-aged children and adolescents.

**Keywords:** Inhibitory control; training; neuroplasticity; childhood; adolescence

## 1. INTRODUCTION

Inhibitory control (IC, i.e., the ability to resist automatisms, temptations, distractions, or interference and to adapt to conflicting situations; see Diamond, 2013) is a core process of cognitive and socioemotional development (for a review, see Borst, Aite, & Houdé, 2015). A growing number of studies have provided evidence that the development of complex skills, such as arithmetic (e.g., Espy et al., 2004; Gilmore et al., 2013), reasoning (for a review, see Houdé & Borst, 2015), theory of mind (e.g., Benson, Sabbagh, Carlson, & Zelazo, 2013; Marcovitch et al., 2015), decision-making (for a review, see Cassotti, Aite, Osmont, Houdé, & Borst, 2014) and creativity (for a review, see Cassotti, Agogue, Camarda, Houdé, & Borst, 2016), rely on the increased efficiency of IC. Moreover, IC abilities in childhood predict later academic and professional success and social adjustment (Diamond, 2013; Kim, Nordling, Yoon, Boldt, & Kochanska, 2013; Moffitt et al., 2011).

Given the critical role of executive functions and IC in particular in cognitive and socioemotional development and academic achievement, a number of training interventions have been designed to improve executive functioning across the lifespan (for reviews see Jolles & Crone, 2012; Karbach & Unger, 2014; Spierer, Chavan, & Manuel, 2013). One of the goals of such studies is to determine to what extent executive control training and IC training in particular transfer to untrained tasks within the same domain or executive function (i.e., near transfer) or in other domains or functions. In preschool children, training IC with a playground activity (e.g., “Wesley says”) improved performance in the Go/NoGo task (i.e., response inhibition) but not in the Stroop task (i.e., interference control), suggesting limited near transfer (Zhao, Chen, Fu, & Maes, 2015) but see Dowsett & Livesey, 2000 for near transfer in preschool children of low-SES families). In addition, computerized IC training in preschool children improved abstract reasoning abilities (i.e., far transfer) (Liu, Zhu, Ziegler, & Shi, 2015 see also Rueda, Rothbart,

1  
2  
3 McCandliss, Saccomanno, & Posner, 2005 for a similar transfer to abstract reasoning abilities  
4 following executive attention training). In adults, IC training with the Simon task and the  
5 emotional Go/NoGo task, for instance, transferred to interference control in an untrained flanker  
6 task (Millner, Jaroszewski, Chamarthi, & Pizzagalli, 2012). However, other studies have shown  
7 no near or far transfer effects of IC training (Enge et al., 2014; Talanow & Ettinger, 2018;  
8 Thorell, Lindqvist, Bergman Nutley, Bohlin, & Klingberg, 2009) or near transfer effects in  
9 children but not in adults (Zhao, Chen, & Maes, 2018).

10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19 IC training studies have also investigated the neuroplastic mechanisms at the root of the  
20 behavioral training effects in children and adults (Jolles & Crone, 2012; Owen et al., 2010) in  
21 core cortico-subcortical regions of the IC network, i.e., the prefrontal cortex (PFC), including the  
22 inferior frontal gyrus (IFG) and the anterior cingulate cortex (ACC), the presupplementary motor  
23 area (pre-SMA), the striatum, the basal ganglia and the parietal cortex (Aron, Robbins, &  
24 Poldrack, 2014; Houdé, Rossi, Lubin, & Joliot, 2010; Satterthwaite et al., 2013). In adults, both  
25 short-term (e.g., 1 h) and mid-term (e.g., 5 to 10 h over several weeks) response inhibition  
26 training using the Go/NoGo task or the Stop-Signal task (SST) led to functional neuroplasticity  
27 either in core regions of the IC networks (Berkman, Kahn, & Merchant, 2014; Manuel,  
28 Bernasconi, & Spierer, 2013), see (Spierer et al., 2013 for a review) or within temporoparietal  
29 cortices suggesting the development with IC training in certain tasks of stimulus-driven, feed-  
30 forward forms of inhibition (Manuel, Grivel, Bernasconi, Murray, & Spierer, 2010). Neuroplastic  
31 changes are not limited to neural activity increases (or decreases) following IC training but also  
32 to functional connectivity changes between the IC network and other networks (Hu, Wang,  
33 Zhang, Hu, & Chen, 2017). For instance, a 5-week interference control training using the Stroop  
34 task led to increased connectivity between the cingulo-opercular network and both the cerebellum  
35 and the primary visual network, and the increased connectivity was associated with behavioral  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

1  
2  
3 training gains (Hu et al., 2017). Finally, one study combined functional and structural magnetic  
4  
5 resonance imaging (MRI) to investigate functional and structural neuroplastic changes after IC  
6  
7 training using an SST (Chavan, Mouthon, Draganski, van der Zwaag, & Spierer, 2015). In this  
8  
9 study, IC improvements at the behavioral level were associated with a decrease in neural activity  
10  
11 in the right pars opercularis and triangularis and in the left pars orbitalis of the inferior frontal  
12  
13 gyri and an increase in gray matter volume in the right pars orbitalis and modulations of white  
14  
15 matter microstructure in the right pars triangularis. In 4- to 6-year-old children, a 5-day executive  
16  
17 attention training led to a more adult-like topography of EEG markers in the flanker task with a  
18  
19 source of activation in the ACC posttraining (Rueda et al., 2005, see also Rueda, Checa, &  
20  
21 Combata, 2012 for 2-month training-induced EEG changes). Finally, a study on children 4 to 5  
22  
23 years of age reported an increase of the N2 component in the Go/NoGo task in girls but not in  
24  
25 boys following a 12-session computerized IC training with a child-friendly version of the  
26  
27 Go/NoGo task (Liu et al., 2015).  
28  
29  
30  
31

32  
33 Surprisingly, no study has investigated the structural neuroplasticity induced by IC  
34  
35 training from childhood to late adolescence, a developmental period characterized by behavioral  
36  
37 improvement of IC (Diamond, 2013) and protracted structural and functional maturation of  
38  
39 several regions of the PFC involved in IC (see for a review Crone & Steinbeis, 2017). The aim of  
40  
41 the present study was thus to investigate the behavioral and structural changes induced by a  
42  
43 computerized IC training in school-aged children (9 to 10 years of age) and in adolescents (15 to  
44  
45 17 years of age) compared to the ones observed following a computerized active control (AC)  
46  
47 training (i.e., to control for test-retest effects and to comply with recommendations of several  
48  
49 meta-analyses, see, e.g., (Diamond & Ling, 2016; Melby-Lervag & Hulme, 2013; Morrison &  
50  
51 Chein, 2011). On each of the 15-min training sessions (5 days a week over a 5-week period),  
52  
53 participants in the IC training group performed a Color-Word Stroop task and an SST while  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 participants in the AC group performed knowledge- and vocabulary-based tasks. The difficulty of  
4  
5 all four tasks was individually tailored to the learning curve of the participants. Pre- and  
6  
7 posttraining, children and adolescents performed computerized *Color-Word Stroop* and *Stop-*  
8  
9 *Signal* tasks to measure IC efficiency, and anatomical MRI was acquired for each participant to  
10  
11 assess the thickness and surface area of the PFC (a key region of the IC network, Aron et al.,  
12  
13 2014). We focused on these two anatomical features of the PFC because they reflect different  
14  
15 maturation processes and are under different genetic influences (Panizzon et al., 2009; Raznahan  
16  
17 et al., 2011) and so might be affected differently by IC training at different ages (see Jolles &  
18  
19 Crone, 2012 for a similar rationale).  
20  
21  
22  
23  
24  
25

## 26 **2. METHOD**

### 27 **2.1. Participants**

28  
29 We recruited 123 healthy participants from public schools: 64 children (27 males,  $M \pm SD$   
30  
31 =  $9.8 \pm 0.56$  years, range = 9 – 10 years) and 59 adolescents (20 males,  $M = 16.4 \pm 0.52$  years,  
32  
33 range = 15 – 17 years). All participants were right-handed as determined by the Edinburgh  
34  
35 Handedness Inventory (Oldfield, 1971), were born full-term, had normal or corrected-to-normal  
36  
37 vision, had no history of neurological disease and had no cerebral abnormalities. Parents or legal  
38  
39 guardians gave written consent, and all children and adults agreed to participate. All participants  
40  
41 were tested in accordance with the national and international norms that govern the use of human  
42  
43 research participants. Two ethics committees approved our study (IRB 2015-A00383-46 and IRB  
44  
45 2015-A00811-48).  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53

### 54 **2.2. Training sessions**

## Inhibition, training and neuroplasticity

1  
2  
3 Participants were asked to perform inhibitory control tasks (IC group) or knowledge- and  
4 vocabulary-based tasks (AC group) 15 min per day, 5 days a week for 5 weeks (25 sessions) on a  
5 tactile tablet at home. Participants were randomly assigned to the IC or the AC groups. In both IC  
6 and AC training, the difficulty was progressively increased and adapted in real time to the  
7 learning curve of each participant to maintain the motivation of the participant and to prevent  
8 automaticity (Buschkuehl, Jaeggi, & Jonides, 2012; Green & Bavelier, 2008; Klingberg, 2010).  
9  
10 All tasks were implemented on the tablet using E-prime 2.0.  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18

19 The IC training included two tasks involving interference control (*Color-Word Stroop*  
20 *task*) and response inhibition (*SST*) because (a) IC is a multidimensional construct (Diamond,  
21 2013) and (b) transfer effects can be potentially larger when the same cognitive function is  
22 trained with different tasks (Buschkuehl et al., 2012; Green & Bavelier, 2008).  
23  
24  
25  
26  
27

28 In the *Color-Word Stroop task*, participants were instructed to identify the ink color (e.g.,  
29 blue) of a printed word denoting a color by pressing one of the four color buttons (i.e., blue,  
30 green, yellow, red) corresponding to the ink color on the tactile tablet. The word color and the ink  
31 color could be either congruent (e.g., BLUE written in blue) or incongruent (e.g., GREEN written  
32 in blue). In addition, we designed control items (i.e., color word written in black) in which  
33 participants were instructed to determine the color denoted by the word. Control items were  
34 intended to force participants to encode the color of the word throughout the training sessions.  
35 Words were presented on the center of the screen in a 24-pt Bold Arial Font. Difficulty increased  
36 in the congruent and incongruent Stroop items as the stimulus onset asynchrony (SOA) decreased  
37 between the presentation of the word (written in light gray) and the coloring of the word in one of  
38 the 4 ink colors (blue, yellow, green and red, see, e.g., Appelbaum, Boehler, Davis, Won, &  
39 Woldorff, 2014). At the start of the training, SOA was set at 450 ms (Level 1) and was decreased  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 by 50 ms steps at each level of task difficulty (up to an SOA of 100 ms in Level 8). At each level,  
4  
5 participants performed 13 control, 13 congruent and 13 incongruent Stroop items.  
6

7  
8 In the *Stop-Signal task*, participants were instructed to press one of two response buttons  
9  
10 on the tactile tablet to indicate the direction of an arrow presented on the screen and to withhold  
11  
12 their response if an auditory signal (i.e., stop signal) was presented after the presentation of the  
13  
14 arrow (e.g., Aron et al., 2014). Difficulty increased as the SOA increased between the  
15  
16 presentation of the arrow and the presentation of the stop signal. On Level 1, SOA was set at 100  
17  
18 ms and was increased by 50 ms steps at each level of task difficulty (up to an SOA of 450 ms in  
19  
20 Level 8). At the beginning of each training session, participants performed 16 Go trials. Each  
21  
22 level in each training session consisted of 30 Go trials and 10 Stop trials.  
23  
24  
25

26  
27 The AC training consisted of knowledge- and vocabulary-based tasks of increasing  
28  
29 difficulty (see Jaeggi, Buschkuhl, Jonides, & Shah, 2011). On each task, 4-choice trivia-like  
30  
31 questions were presented, and participants were asked to answer by pressing on one of the four  
32  
33 answers presented on the screen. A maximum of 30 s was allowed to reply to each question. An  
34  
35 online pretest performed on more than 1600 children and adolescents helped us select the  
36  
37 questions assigned to each of the 8 levels of difficulty in each of the two tasks. Ten questions  
38  
39 were presented on each level.  
40  
41

42  
43 At the end of each level, based on the achieved accuracy, participants earned points that  
44  
45 they could redeem at the end of the 25 training sessions for a small gift (books and card or board  
46  
47 games). In all four tasks, task difficulty was increased when participants achieved 90% accuracy  
48  
49 on a given level, decreased when participants failed to achieve 70% accuracy on a given level and  
50  
51 remained the same when participants reached accuracy between 70% to 90% on a given level. On  
52  
53 each task of each training session, participants started the session with the difficulty level one  
54  
55 level below the one they achieved on the last level of the previous training session. At the end of  
56  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

each training session, parents were instructed to send the data file generated by E-prime 2.0, and participants were asked to complete a short autoevaluation of their motivation and engagement during the session.

To determine whether children and adolescents progressed in the CI and the AC training groups, we ran separate Training Session (first session vs last session) x Age (children vs adolescents) ANOVAs on the average level of difficulty reached by the participants in the two tasks in the session in the AC and the IC groups. For the AC group, we found a main effect of training session,  $F(1, 61) = 288.55, p < .001, \eta^2_p = 0.83$ , age,  $F(1, 61) = 7.54, p < .01, \eta^2_p = 0.11$ , and a significant two-way interaction between age and training session,  $F(1, 61) = 8.53, p < .01, \eta^2_p = 0.12$ . For the IC group, we found a main effect of training session,  $F(1, 64) = 182.8, p < .001, \eta^2_p = 0.74$ , but no main effect of age,  $F(1, 64) = 3.39, p = .07$  and no two-way interaction,  $F(1, 64) = 1.02, p = .32$ . Importantly, participants progressed from the first to the last training sessions in both training groups.

### 2.3. Pre- and posttraining sessions

Participants performed two inhibitory control tasks in the pre- and posttraining sessions: A Color-Word Stroop task and a Stop-Signal task. Both tasks were implemented with E-prime 2.0 and performed individually on a laptop computer with a resolution of 1366 x 768 pixels and a refresh rate of 60 Hz.

In the *Color-Word Stroop* task, we designed 16 Stroop items (i.e., 4 congruent and 12 incongruent items) by combining four different color names (i.e., 'red', 'green', 'blue' and 'yellow') with the four corresponding ink colors (RGB color codes 255;0;0, 0;255;0, 0;0;255, and 255;255;0). Items were displayed in the center of the screen in 24-pt Bold Courier New on a gray background (RGB code 135;135;135). Participants were instructed to identify the ink color of the

1  
2  
3 printed word by pressing one of two keyboard buttons with their left and right index fingers: the  
4  
5 's' key for yellow and blue, 'l' key for red and green. Each key was labeled with a sticker of the  
6  
7 corresponding colors. Each trial started with the presentation of a black fixation cross on a gray  
8  
9 background for 1500 ms, and then one of the color words was displayed for a maximal duration  
10  
11 of 3000 ms. Participants performed one block of 64 experimental trials and two blocks of training  
12  
13 trials. In the first block, participants learned to associate each response button to the  
14  
15 corresponding color by pressing the key on the keyboard corresponding to the color dot presented  
16  
17 on the screen (each color dot was presented two times for a total of 8 trials). In the second block,  
18  
19 participants performed 6 congruent and 6 incongruent Stroop items and received feedback on the  
20  
21 correctness of their answer. The presentation of the trials was randomized in all three blocks of  
22  
23 trials. We separately averaged the response times (RTs) on correctly performed congruent and  
24  
25 incongruent trials for each participant. We then computed for each participant a Stroop score, i.e.,  
26  
27 difference in RTs between congruent and incongruent items, with higher Stroop scores revealing  
28  
29 lower IC efficiency.  
30  
31  
32  
33  
34

35 In *the stop-signal task*, each trial started with the presentation of a circle (250 ms). An  
36  
37 arrow was then presented within the circle, and the participants were instructed to press as  
38  
39 quickly as possible the left button of the mouse when the arrow was pointing to the left and the  
40  
41 right button of the mouse when the arrow was pointing to the right unless an auditory signal (i.e.,  
42  
43 stop signal, 750 Hz, 75 ms) was presented with variable delays (i.e., stop-signal delay, SSD) after  
44  
45 the presentation of the arrow. The delay between the presentation of the arrow and the stop signal  
46  
47 started at 250 ms and increased by 50 ms after a successful stop trial (up to a 1150 ms delay) and  
48  
49 decreased by 50 ms after a failed stop trial (up to a 50 ms delay). Each trial lasted 2000 ms, and  
50  
51 participants could provide their answer during the total duration of the trial. Participants first  
52  
53 performed a practice block of 32 trials (8 Stop trials and 24 Go trials) and then three blocks of 64  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

1  
2  
3 experimental trials (16 Stop trials and 48 Go trials per block). In half of the trials, the arrow was  
4  
5 pointing to the left and in half to the right. For each participant, we computed the stop-signal  
6  
7 reaction time (SSRT) by subtracting the raw RTs on correctly performed Go trials to the median  
8  
9 SSD (Logan, Schachar, & Tannock, 1997). Similar to the *color-word Stroop task*, longer SSRTs  
10  
11 revealed lower IC efficiency.  
12  
13

14  
15 Receptivity of cognitive training was assessed from the relative changes, namely, relative  
16  
17 changes = (post – pre) / pre, in either the Stroop score (i.e., *color-word Stroop task*) or the SSRT  
18  
19 (i.e., *stop-signal task*). For each task, relative changes in either Stroop score or SSRT were  
20  
21 screened and cleaned for possible aberrant values using a nonparametric approach: values lower  
22  
23 than median - 3 MAD or greater than median + 3 MAD (MAD: median absolute deviation) were  
24  
25 considered outliers. Data imputation, based on the median value over the whole sample in each  
26  
27 age group, was applied to replace missing data and outliers. Finally, a composite score,  
28  
29 combining the relative changes in each task, was then computed to capture a more general IC  
30  
31 construct and reduce task-specific variance. This composite score corresponded to the sum of the  
32  
33 relative change of each task that were previously cleaned, imputed and Z-score transformed.  
34  
35  
36  
37  
38  
39

#### 40 **2.4. MRI acquisition**

41  
42  
43  
44 High-resolution isotropic 3T sagittal MRI data (1 x 1 x 1 mm) were acquired for children  
45  
46 and adolescents. MRI data of children were acquired at the Cyceron biomedical imaging platform  
47  
48 (Archieva, Philips Medical System, The Netherlands). Before the scans, children were  
49  
50 familiarized with the MRI session noise in a fake MRI and were trained not to move during the  
51  
52 acquisition. To reduce motion, children passively watched a cartoon on an MRI-compatible  
53  
54 screen, also by decreasing waiting times and providing a more positive experience (Lemaire,  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 Moran, & Swan, 2009). MRI data of adolescents were acquired at the CIREN biomedical  
4  
5 imaging platform (General Electric Healthcare). Sequence parameters were optimized in each site  
6  
7 to reach similar acquisition at Cyceron (TE = 3.3; TR = 7.2; flip angle = 9) and at CIREN (TE =  
8  
9 3.2; TR = 8.2; flip angle = 11).

## 14 15 **2.5. MRI analysis**

16  
17 Complementary morphometric features of the cortex anatomy (Panizzon et al., 2009;  
18  
19 Raznahan et al., 2011), namely, cortical thickness (CT) and cortical surface area (CSA), were  
20  
21 automatically obtained with a fully automated set of tools available in the FreeSurfer software  
22  
23 suite (<http://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/>).

24  
25  
26 T1-weighted structural images were corrected for distortions due to gradient  
27  
28 nonlinearities, coregistered, averaged, and rigidly resampled into alignment with an atlas brain.  
29  
30 Details regarding surface-based cortical reconstruction and subcortical volumetric segmentation  
31  
32 can be found elsewhere (Dale, Fischl, & Sereno, 1999; Fischl & Dale, 2000; Fischl, Sereno, &  
33  
34 Dale, 1999; Fischl, Sereno, Tootell, & Dale, 1999; Fischl et al., 2004). Note that these  
35  
36 morphometric procedures have been validated for children as young as 4 years old (Ghosh et al.,  
37  
38 2010). Based on the MRI scans of each participant, a 3D model of the cortical surface was  
39  
40 constructed. This 3D model included the segmentation of the white matter, the tessellation of the  
41  
42 gray/white matter boundary, the inflation of the folded, tessellated surface, and the correction of  
43  
44 topological defects. Cortical thicknesses were calculated from this cortical surface reconstruction  
45  
46 by estimating and then refining the gray/white boundary, deforming the surface out to the pial  
47  
48 surface, and measuring the distances from each point on the white matter surface to the pial  
49  
50 surface (Fischl & Dale, 2000). CT was calculated as the closest distance from the gray/white  
51  
52 surface (Fischl & Dale, 2000). CT was calculated as the closest distance from the gray/white  
53  
54 boundary to the gray/CSF boundary at each vertex on the tessellated surface (Fischl & Dale,  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

2000). CSA was calculated at the pial level and represents the area of vertex on the gray matter surface, calculated as the average of the area of the tessellated triangles touching that vertex.

To increase the signal-to-noise ratio, cortical surface features were extracted from the Destrieux atlas (Destrieux, Fischl, Dale, & Halgren, 2010) and averaged over regions of the prefrontal cortex (PFC). The anatomy of these regions was previously associated with IC efficiency (Fjell et al., 2012; Kharitonova, Martin, Gabrieli, & Sheridan, 2013; Takeuchi et al., 2012; Westlye, Grydeland, Walhovd, & Fjell, 2011).

## 2.6. Statistical analysis

Relative changes in cognitive performance (i.e., composite IC score) and PFC anatomy (i.e., regional CT and CSA) after training were analyzed using linear models including training group (IC vs. AC), gender (male vs. female) and age group (child vs. adolescent) as categorical factors. To test whether cognitive changes were paralleled by anatomical changes, regional CT and CSA with group-specific changes were further analyzed using linear models including relative changes in composite IC score as a quantitative covariate along with Training group (IC vs. AC), Gender (Boy vs. Girl) and Age (child vs. adolescent) as categorical factors.

The main effects and interactions were probed with F tests, and post hoc paired comparisons were probed with Tukey's HSD test with Bonferroni correction. A two-tailed p-value of less than .05 was considered statistically significant.

Relative, instead of absolute, changes were used in the analyses to control for baseline variability. All statistical analyses were carried out with R 2.9 software (<http://www.r-project.org/>) and 'car', 'effects' and 'Hmisc' libraries.

### 3. RESULTS

#### 3.1. Changes in IC efficiency

Analysis of the cognitive changes after cognitive training, assessed from the composite score based on the combination of the relative changes of the two tasks performed in the pre- and posttest sessions, revealed a significant three-way interaction among Training group (IC vs AC), Gender (Boy vs Girl) and Age (Child vs Adolescent),  $F(1, 115) = 6.19$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2_p = 0.05$  (see **Table 1 and Figure 1**). All other main and interaction effects failed to reach significance,  $p > .12$ .

When we restricted the analysis to children, we observed a significant two-way interaction between the Training group (IC vs. AC) and Gender (Boys vs. Girls),  $F(1, 60) = 4.72$ ,  $p = .03$ ,  $\eta^2_p = 0.07$ . We found that the IC composite score was smaller and thus IC efficiency better after training than before in the IC group but not in the AC group in boys  $T = 2.63$ ,  $p = .05$ , but not in girls,  $T = 1.48$ ,  $p = .46$ . The main effect of Training group,  $F(1, 115) = 2.29$ ,  $p = .13$ , and Gender,  $F < 1$ , failed to reach significance. Analyses restricted to adolescents revealed no main effect of group,  $F < 1$ , Gender,  $F < 1$ , or two-way interaction between the Training group and Gender,  $F(1, 55) = 1.85$ ,  $p = .18$ .

#### 3.2. Changes in PFC anatomy

Analysis of the cortex anatomy of children and adolescents revealed training group-specific changes in the cortical thickness (CT) of the left short insular gyrus, the right lateral orbital sulcus, the right pars orbitalis, the left pars triangularis and the right orbital sulcus and in the cortical surface area (CSA) of the left pars triangularis, the right inferior segment of the insula circular sulcus, the right superior frontal, the right orbital sulcus, the left inferior frontal, and the

1  
2  
3 right pars opercularis. Regarding cognitive changes, changes in PFC anatomy were complex and  
4  
5 modulated by the training group and the age and/or the gender of the participants (see **Table 2**  
6  
7 **and Figure 2** for details).

### 10 **3.3. Associations between IC efficiency changes and PFC anatomy changes**

11  
12 Finally, we investigated the possible associations between the changes in IC efficiency  
13  
14 and the changes in PFC anatomy induced by training. We observed changes in CT of the right  
15  
16 pars orbitalis and in CSA of the left pars triangularis, the right orbital sulcus, and the right pars  
17  
18 opercularis that were associated with IC efficiency changes induced by training modulated by  
19  
20 training group, age and/or gender (see details in **Table 3**).  
21  
22  
23  
24  
25

## 26 **4. DISCUSSION**

27  
28 We used structural MRI and a longitudinal design to determine the effects of an intensive  
29  
30 and individualized IC computerized adaptive training in school-aged children and adolescents on  
31  
32 PFC anatomy. IC efficiency assessed by the performance in the trained IC tasks (i.e., *Color-Word*  
33  
34 *Stroop task and Stop-Signal task*) changed after training as a function of the type of training  
35  
36 received (IC or AC), age and gender. In particular, children's IC efficiency improved from the  
37  
38 pre- to the posttraining session more in the IC than in the AC group in boys but not in girls. In  
39  
40 addition, no training-related behavioral change in IC efficiency was observed in adolescents.  
41  
42 Note that in our study, the behavioral changes in IC efficiency were limited to boys in the school-  
43  
44 aged children group, while at least one study reported IC efficiency training-related improvement  
45  
46 in girls but not boys in preschool children (Liu et al., 2015). Taken together, these findings  
47  
48 suggest that IC efficiency training-related changes are dependent on an interaction between the  
49  
50 developmental period the training is tailored to and the gender of the participants.  
51  
52  
53  
54  
55

56 At the structural brain level, we observed IC training-related changes in CT and CSA in  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 several PFC subregions that were age- and gender-specific. In particular and consistent with a  
4  
5 previous MRI study in adults (Chavan et al., 2015), we observed structural changes in the pars  
6  
7 opercularis, triangularis, and orbitalis of the inferior frontal gyri (IFG), an epicenter of IC in adults  
8  
9 (e.g., Aron et al., 2014), adolescents and children (Houdé et al., 2010). Importantly, these  
10  
11 structural changes seemed to be training-specific given that changes in CT and CSA of these IFG  
12  
13 regions were associated with behavioral IC training-related changes. Taken together, our study  
14  
15 provided the first evidence of the complex structural neuroplastic mechanisms at the root of  
16  
17 behavioral changes in IC efficiency from pre- to posttraining in school-aged children and  
18  
19 adolescents. Although we did not directly assess potential near and far transfers in the present  
20  
21 study, we speculate that transfer effects at the behavioral level might be observed in tasks that  
22  
23 rely on regions in which we observed neuroplastic changes in the present study.  
24  
25  
26  
27

28  
29 Similar to neuroplastic mechanisms observed during brain maturation (Giedd & Rapoport,  
30  
31 2010; Lenroot et al., 2007; Raznahan et al., 2011; Wierenga, Langen, Oranje, & Durston, 2014),  
32  
33 IC training induced gender- and age-dependent neuroplastic changes that were specific to the  
34  
35 cortical region and the anatomical feature (CSA or CT) considered. Indeed, longitudinal MR  
36  
37 studies of typically developing children and adolescents revealed inverted U-shaped trajectories  
38  
39 of gray matter volumes with peak sizes occurring at different times in different regions (Giedd &  
40  
41 Rapoport, 2010) with sexual dimorphism (Lenroot et al., 2007). The similarity between the  
42  
43 structural changes (and the factors that affect these changes) observed during development and  
44  
45 after cognitive training might suggest that the changes in neurons, glial cells, and myelin  
46  
47 characterizing the neuroplastic processes observed during development might also underlie  
48  
49 neuroplastic processes at the root of cognitive training. If so, then cognitive training and IC  
50  
51 training in particular may affect neurodevelopmental mechanisms and improve IC functioning by  
52  
53 speeding-up brain development (Denney, 1984; Jolles & Crone, 2012).  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

1  
2  
3 Finally, we found IC training-related changes that differed as a function of the anatomical  
4 feature considered, i.e., CSA or CT, which suggested that IC training changes could be supported  
5 by different neuroplastic mechanisms. This is consistent with the “radial unit hypothesis” (Rakic,  
6 1988, 2000) that assumes that the CSA of a given cortical area essentially reflects the number of  
7 cortical columns, while CT essentially reflects the number and size of cells within a column and  
8 packing density, as well as the number of connections and the extent of their myelination  
9 (Eickhoff et al., 2005; Rakic, 1988). CSA may also reflect folding, which depends on the division  
10 of progenitor cells in the periventricular area during embryogenesis (Chenn & Walsh, 2002) and  
11 CT dendritic arborization and pruning (Huttenlocher, 1990). Finally, the idea that IC training-  
12 related changes might be sustained by different neuroplastic mechanisms is further supported by  
13 the fact that CSA and CT have different genetic origins (Panizzon et al., 2009) and distinct  
14 developmental trajectories (Raznahan et al., 2011; Wierenga et al., 2014).

15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31 The present study has several limitations that call for caution when interpreting the  
32 results. First, we focused on the PFC structure to measure the IC training-related effect because  
33 the PFC is a critical region of the functional IC network (Aron et al., 2014; Houdé et al., 2010 ;  
34 Satterthwaite et al., 2013). IC, however, relies not only on the PFC but also on posterior cortical  
35 regions, such as the inferior parietal lobule (Criaud & Boulinguez, 2013), the superior parietal  
36 gyrus (Zhang, Geng, & Lee, 2017) and the fusiform gyrus (Simmonds, Pekar, & Mostofsky,  
37 2008), and subcortical structures, such as the basal ganglia, the thalamus and the cerebellum  
38 (Dosenbach, Fair, Cohen, Schlaggar, & Petersen, 2008; Niendam et al., 2012). Second, despite  
39 the large sample size of school-aged and adolescents used in our microlongitudinal study, the  
40 sizes of the effects reported were small, and the statistical power of our analyses precluded  
41 corrections of the p-values for multiple comparisons, which in turn inflated the risk of Type 1  
42 error. That said, we note that a smaller effect size in a larger sample is not uncommon in  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 neuroimaging studies (Button et al., 2013), and the small effect sizes observed in the MRI data  
4  
5 analyses are consistent with the small effect sizes reported on the IC efficiency training-related  
6  
7 changes observed at the behavioral level. Third, MRI data of children and adolescents were  
8  
9 acquired on scanners with equal strength (3T) but on two different sites. Although acquisition  
10  
11 parameters were optimized to yield as similar as possible MR signals, it is difficult to disentangle,  
12  
13 in the comparison of children and adolescent data, the site effect from the age effect, except when  
14  
15 we investigated the CSA and CT training-related changes associated with the IC efficiency  
16  
17 training-related changes, which was the critical analysis. In light of these limitations, further  
18  
19 studies should be conducted on larger samples using a whole-brain approach for the analyses and  
20  
21 a single site for the acquisition of the structural MRI data.  
22  
23  
24  
25  
26  
27

## 28 **5. CONCLUSION**

29  
30 In conclusion, we provide the first evidence of the complex age- and gender-dependent  
31  
32 structural neuroplastic mechanisms that might support IC efficiency changes following a 5-week  
33  
34 intensive and individualized IC computerized adaptive training in school-aged children and  
35  
36 adolescents. The neuroplastic mechanisms observed following IC training in school-aged  
37  
38 children and adolescents are affected by similar factors (i.e., age and gender) to those affecting  
39  
40 brain maturation; thus, training might be improving cognitive functioning by accelerating  
41  
42 development rather than deviating from the typical developmental trajectory (see Jolles & Crone,  
43  
44 2012).  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## REFERENCES

- 1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8 Appelbaum, L. G., Boehler, C. N., Davis, L. A., Won, R. J., & Woldorff, M. G. (2014). The  
9  
10 dynamics of proactive and reactive cognitive control processes in the human brain.  
11  
12 *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(5), 1021-1038.  
13  
14  
15 Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014). Inhibition and the right inferior frontal  
16  
17 cortex: one decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), 177-185.  
18  
19  
20 Benson, J. E., Sabbagh, M. A., Carlson, S. M., & Zelazo, P. D. (2013). Individual differences in  
21  
22 executive functioning predict preschoolers' improvement from theory-of-mind training.  
23  
24 *Developmental Psychology*, 49(9), 1615-1627.  
25  
26  
27 Berkman, E. T., Kahn, L. E., & Merchant, J. S. (2014). Training-induced changes in inhibitory  
28  
29 control network activity. *Journal of Neuroscience*, 34(1), 149-157.  
30  
31  
32 Borst, G., Aite, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism  
33  
34 for typical cognitive development: evidence from behavioural and brain-imaging studies.  
35  
36 *Developmental Medicine and Child Neurology*, 57 Suppl 2, 21-25.  
37  
38  
39 Buschkuhl, M., Jaeggi, S. M., & Jonides, J. (2012). Neuronal effects following working memory  
40  
41 training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2 Suppl 1, S167-179.  
42  
43  
44 Button, K. S., Ioannidis, J. P., Mokrysz, C., Nosek, B. A., Flint, J., Robinson, E. S., et al. (2013).  
45  
46 Power failure: why small sample size undermines the reliability of neuroscience. *Nature*  
47  
48 *Review Neuroscience*, 14(5), 365-376.  
49  
50  
51 Cassotti, M., Agogue, M., Camarda, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory Control as a  
52  
53 Core Process of Creative Problem Solving and Idea Generation from Childhood to  
54  
55 Adulthood. *New Directions in Child & Adolescent Development*, 2016(151), 61-72.  
56  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Cassotti, M., Aite, A., Osmont, A., Houdé, O., & Borst, G. (2014). What have we learned about  
4 the processes involved in the Iowa Gambling Task from developmental studies? *Frontiers*  
5 *in Psychology*, 5, 915.  
6  
7  
8  
9  
10 Chavan, C. F., Mouthon, M., Draganski, B., van der Zwaag, W., & Spierer, L. (2015).  
11 Differential patterns of functional and structural plasticity within and between inferior  
12 frontal gyri support training-induced improvements in inhibitory control proficiency.  
13 *Human Brain Mapping*, 36(7), 2527-2543.  
14  
15  
16  
17  
18  
19 Chenn, A., & Walsh, C. A. (2002). Regulation of cerebral cortical size by control of cell cycle  
20 exit in neural precursors. *Science*, 297(5580), 365-369.  
21  
22  
23  
24 Criaud, M., & Boulinguez, P. (2013). Have we been asking the right questions when assessing  
25 response inhibition in go/no-go tasks with fMRI? A meta-analysis and critical review.  
26 *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(1), 11-23.  
27  
28  
29  
30  
31 Crone, E. A., & Steinbeis, N. (2017). Neural Perspectives on Cognitive Control Development  
32 during Childhood and Adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(3), 205-215.  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40 Dale, A. M., Fischl, B., & Sereno, M. I. (1999). Cortical surface-based analysis. I. Segmentation  
41 and surface reconstruction. *Neuroimage*, 9(2), 179-194.  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60
- Denny, N. W. (1984). A model of cognitive development across the life span. *Developmental Review*, 4(2), 171-191.
- Destrieux, C., Fischl, B., Dale, A., & Halgren, E. (2010). Automatic parcellation of human cortical gyri and sulci using standard anatomical nomenclature. *Neuroimage*, 53(1), 1-15.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168.
- 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.

## Inhibition, training and neuroplasticity

- 1  
2  
3 Dosenbach, N. U., Fair, D. A., Cohen, A. L., Schlaggar, B. L., & Petersen, S. E. (2008). A dual-  
4 networks architecture of top-down control. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(3), 99-105.  
5  
6  
7  
8 Dowsett, S. M., & Livesey, D. J. (2000). The development of inhibitory control in preschool  
9 children: effects of "executive skills" training. *Developmental Psychobiology*, 36(2), 161-  
10 174.  
11  
12  
13  
14 Eickhoff, S., Walters, N. B., Schleicher, A., Kril, J., Egan, G. F., Zilles, K., et al. (2005). High-  
15 resolution MRI reflects myeloarchitecture and cytoarchitecture of human cerebral cortex.  
16  
17  
18 *Human Brain Mapping*, 24(3), 206-215.  
19  
20  
21 Enge, S., Behnke, A., Fleischhauer, M., Kuttler, L., Kliegel, M., & Strobel, A. (2014). No  
22 evidence for true training and transfer effects after inhibitory control training in young  
23 healthy adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*,  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31 Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A., & Senn, T. E. (2004).  
32 The contribution of executive functions to emergent mathematic skills in preschool  
33 children. *Developmental Neuropsychology*, 26(1), 465-486.  
34  
35  
36  
37  
38 Fischl, B., & Dale, A. M. (2000). Measuring the thickness of the human cerebral cortex from  
39 magnetic resonance images. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*,  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48 Fischl, B., Sereno, M. I., & Dale, A. M. (1999). Cortical surface-based analysis: II: inflation,  
49 flattening, and a surface-based coordinate system. *Neuroimage*, 9(2), 195-207.  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60 Fischl, B., Sereno, M. I., Tootell, R. B., & Dale, A. M. (1999). High-resolution intersubject  
averaging and a coordinate system for the cortical surface. *Human Brain Mapping*, 8(4),  
272-284.

- 1  
2  
3 Fischl, B., van der Kouwe, A., Destrieux, C., Halgren, E., Segonne, F., Salat, D. H., et al. (2004).  
4  
5 Automatically parcellating the human cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, *14*(1), 11-22.  
6  
7  
8 Fjell, A. M., Walhovd, K. B., Brown, T. T., Kuperman, J. M., Chung, Y., Hagler, D. J., Jr., et al.  
9  
10 (2012). Multimodal imaging of the self-regulating developing brain. *Proceedings of the*  
11  
12 *National Academy of Sciences U S A*, *109*(48), 19620-19625.  
13  
14  
15 Ghosh, S. S., Kakunoori, S., Augustinack, J., Nieto-Castanon, A., Kovelman, I., Gaab, N., et al.  
16  
17 (2010). Evaluating the validity of volume-based and surface-based brain image  
18  
19 registration for developmental cognitive neuroscience studies in children 4 to 11 years of  
20  
21 age. *Neuroimage*, *53*(1), 85-93.  
22  
23  
24 Giedd, J. N., & Rapoport, J. L. (2010). Structural MRI of pediatric brain development: what have  
25  
26 we learned and where are we going? *Neuron*, *67*(5), 728-734.  
27  
28  
29 Gilmore, C., Attridge, N., Clayton, S., Cragg, L., Johnson, S., Marlow, N., et al. (2013).  
30  
31 Individual differences in inhibitory control, not non-verbal number acuity, correlate with  
32  
33 mathematics achievement. *PLoS One*, *8*(6), e67374.  
34  
35  
36 Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Exercising your brain: a review of human brain plasticity  
37  
38 and training-induced learning. *Psychology of Aging*, *23*(4), 692-701.  
39  
40  
41 Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain.  
42  
43 *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 148.  
44  
45  
46 Houdé, O., Rossi, S., Lubin, A., & Joliot, M. (2010). Mapping numerical processing, reading, and  
47  
48 executive functions in the developing brain: an fMRI meta-analysis of 52 studies  
49  
50 including 842 children. *Developmental Science*, *13*(6), 876-885.  
51  
52  
53 Hu, M., Wang, X., Zhang, W., Hu, X., & Chen, A. (2017). Neural interactions mediating conflict  
54  
55 control and its training-induced plasticity. *Neuroimage*, *163*, 390-397.  
56  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

- 1  
2  
3 Huttenlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development.  
4  
5 *Neuropsychologia*, 28(6), 517-527.  
6  
7  
8 Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Shah, P. (2011). Short- and long-term benefits of  
9  
10 cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 108(25),  
11  
12 10081-10086.  
13  
14  
15 Jolles, D. D., & Crone, E. A. (2012). Training the developing brain: a neurocognitive perspective.  
16  
17 *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 76.  
18  
19  
20 Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to  
21  
22 adolescence. *Frontiers in Psychology*, 5, 390.  
23  
24  
25 Kharitonova, M., Martin, R. E., Gabrieli, J. D., & Sheridan, M. A. (2013). Cortical gray-matter  
26  
27 thinning is associated with age-related improvements on executive function tasks.  
28  
29 *Developmental Cognitive Neuroscience*, 6, 61-71.  
30  
31  
32 Kim, S., Nordling, J. K., Yoon, J. E., Boldt, L. J., & Kochanska, G. (2013). Effortful control in  
33  
34 "hot" and "cool" tasks differentially predicts children's behavior problems and academic  
35  
36 performance. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 41(1), 43-56.  
37  
38  
39 Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*,  
40  
41 14(7), 317-324.  
42  
43  
44 Lemaire, C., Moran, G. R., & Swan, H. (2009). Impact of audio/visual systems on pediatric  
45  
46 sedation in magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 30(3),  
47  
48 649-655.  
49  
50  
51 Lenroot, R. K., Gogtay, N., Greenstein, D. K., Wells, E. M., Wallace, G. L., Clasen, L. S., et al.  
52  
53 (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and  
54  
55 adolescence. *Neuroimage*, 36(4), 1065-1073.  
56  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Liu, Q., Zhu, X., Ziegler, A., & Shi, J. (2015). The effects of inhibitory control training for  
4 preschoolers on reasoning ability and neural activity. *Scientific Reports*, *5*, 14200.  
5  
6  
7 Logan, G. D., Schachar, R. J., & Tannock, R. (1997). Impulsivity and inhibitory control.  
8  
9  
10 *Psychological science*, *8*(1), 60-64.  
11  
12 Manuel, A. L., Bernasconi, F., & Spierer, L. (2013). Plastic modifications within inhibitory  
13 control networks induced by practicing a stop-signal task: an electrical neuroimaging  
14 study. *Cortex*, *49*(4), 1141-1147.  
15  
16  
17 Manuel, A. L., Grivel, J., Bernasconi, F., Murray, M. M., & Spierer, L. (2010). Brain dynamics  
18 underlying training-induced improvement in suppressing inappropriate action. *Journal of*  
19 *Neuroscience*, *30*(41), 13670-13678.  
20  
21  
22 Marcovitch, S., O'Brien, M., Calkins, S. D., Leerkes, E. M., Weaver, J. M., & Levine, D. W.  
23  
24  
25 (2015). A Longitudinal Assessment of the Relation between Executive Function and  
26 Theory of Mind at 3, 4, and 5 Years. *Cognitive Development*, *33*, 40-55.  
27  
28  
29 Melby-Lervag, M., & Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic  
30 review. *Developmental Psychology*, *49*(2), 270-291.  
31  
32  
33 Millner, A. J., Jaroszewski, A. C., Chamarthi, H., & Pizzagalli, D. A. (2012). Behavioral and  
34 electrophysiological correlates of training-induced cognitive control improvements.  
35  
36  
37 *Neuroimage*, *63*(2), 742-753.  
38  
39  
40 Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., et al.  
41  
42  
43 (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety.  
44  
45  
46 *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, *108*(7), 2693-2698.  
47  
48  
49 Morrison, A. B., & Chein, J. M. (2011). Does working memory training work? The promise and  
50 challenges of enhancing cognition by training working memory. *Psychonomic Bulletin &*  
51  
52  
53 *Review*, *18*(1), 46-60.  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

- 1  
2  
3 Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012).  
4  
5 Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse  
6  
7 executive functions. *Cognitive and Affective Behavioral Neuroscience*, *12*(2), 241-268.  
8  
9  
10 Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory.  
11  
12 *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113.  
13  
14 Owen, A. M., Hampshire, A., Grahn, J. A., Stenton, R., Dajani, S., Burns, A. S., et al. (2010).  
15  
16 Putting brain training to the test. *Nature*, *465*(7299), 775-778.  
17  
18  
19 Panizzon, M. S., Fennema-Notestine, C., Eyler, L. T., Jernigan, T. L., Prom-Wormley, E., Neale,  
20  
21 M., et al. (2009). Distinct genetic influences on cortical surface area and cortical  
22  
23 thickness. *Cerebral Cortex*, *19*(11), 2728-2735.  
24  
25  
26 Rakic, P. (1988). Specification of cerebral cortical areas. *Science*, *241*(4862), 170-176.  
27  
28  
29 Rakic, P. (2000). Radial unit hypothesis of neocortical expansion. *Novartis Found Symp*, *228*, 30-  
30  
31 42; discussion 42-52.  
32  
33 Raznahan, A., Shaw, P., Lalonde, F., Stockman, M., Wallace, G. L., Greenstein, D., et al. (2011).  
34  
35 How does your cortex grow? *Journal of Neuroscience*, *31*(19), 7174-7177.  
36  
37  
38 Rueda, M. R., Checa, P., & Combita, L. M. (2012). Enhanced efficiency of the executive  
39  
40 attention network after training in preschool children: immediate changes and effects after  
41  
42 two months. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *2 Suppl 1*, S192-204.  
43  
44  
45 Rueda, M. R., Rothbart, M. K., McCandliss, B. D., Saccomanno, L., & Posner, M. I. (2005).  
46  
47 Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention.  
48  
49 *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, *102*(41), 14931-14936.  
50  
51  
52 Satterthwaite, T. D., Wolf, D. H., Erus, G., Ruparel, K., Elliott, M. A., Gennatas, E. D., et al.  
53  
54 (2013). Functional maturation of the executive system during adolescence. *Journal of*  
55  
56 *Neuroscience*, *33*(41), 16249-16261.  
57  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

- 1  
2  
3 Simmonds, D. J., Pekar, J. J., & Mostofsky, S. H. (2008). Meta-analysis of Go/No-go tasks  
4  
5 demonstrating that fMRI activation associated with response inhibition is task-dependent.  
6  
7 *Neuropsychologia*, 46(1), 224-232.  
8  
9  
10 Spierer, L., Chavan, C. F., & Manuel, A. L. (2013). Training-induced behavioral and brain  
11  
12 plasticity in inhibitory control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 427.  
13  
14  
15 Takeuchi, H., Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Nagase, T., et al. (2012).  
16  
17 Regional gray and white matter volume associated with Stroop interference: evidence  
18  
19 from voxel-based morphometry. *Neuroimage*, 59(3), 2899-2907.  
20  
21  
22 Talanow, T., & Ettinger, U. (2018). Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control  
23  
24 training in healthy adults. *Acta Psychologica (Amst)*, 187, 37-53.  
25  
26  
27 Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training  
28  
29 and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science*,  
30  
31 12(1), 106-113.  
32  
33  
34 Westlye, L. T., Grydeland, H., Walhovd, K. B., & Fjell, A. M. (2011). Associations between  
35  
36 regional cortical thickness and attentional networks as measured by the attention network  
37  
38 test. *Cerebral Cortex*, 21(2), 345-356.  
39  
40  
41 Wierenga, L. M., Langen, M., Oranje, B., & Durston, S. (2014). Unique developmental  
42  
43 trajectories of cortical thickness and surface area. *Neuroimage*, 87, 120-126.  
44  
45  
46 Zhang, R., Geng, X., & Lee, T. M. C. (2017). Large-scale functional neural network correlates of  
47  
48 response inhibition: an fMRI meta-analysis. *Brain Structure and Function*, 222(9), 3973-  
49  
50 3990.  
51  
52  
53 Zhao, X., Chen, L., Fu, L., & Maes, J. H. (2015). "Wesley says": a children's response inhibition  
54  
55 playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Frontiers in*  
56  
57 *Psychology*, 6, 207.  
58  
59  
60

## Inhibition, training and neuroplasticity

1  
2  
3 Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. R. (2018). Training and transfer effects of response inhibition  
4  
5 training in children and adults. *Developmental Science*, 21, 1-12.  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

Review Copy Only

**Table 1. Relative change in IC efficiency after cognitive training (inhibitory control vs active control) in children and adolescents, stratified by gender.** Data (composite score of relative cognitive change) are reported as the mean  $\pm$  standard error.

	Children		Adolescents	
	IC training	AC training	IC training	AC training
Girls	0.015 $\pm$ 0.34	-0.118 $\pm$ 0.35	-0.200 $\pm$ 0.32	0.398 $\pm$ 0.35
Boys	-0.791 $\pm$ 0.40	0.783 $\pm$ 0.41	0.217 $\pm$ 0.47	-0.241 $\pm$ 0.47

## Inhibition, training and neuroplasticity

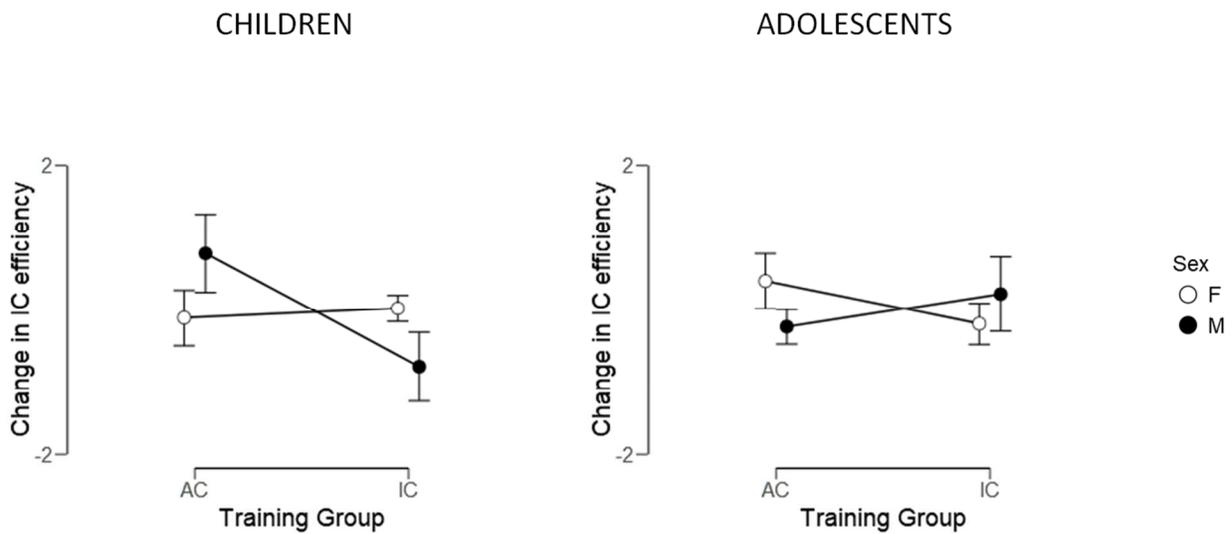
**Table 2. Statistical results of the linear models for the comparisons of relative changes in cortical thickness (CT) and cortical surface area (CSA) of PFC regions after training. The results are reported in decreasing order of significance.**

<b>Morphometric feature</b>	<b>Factor in the linear model</b>	<b>Side</b>	<b>PFC region</b>	<b>F-value</b>	<b>P-value</b>
CSA	Group x Age x Gender	Left	pars triangularis	9	0.003
CT	Group x Age x Gender	Left	short insular gyrus	7.9	0.006
CSA	Group x Age	Right	inf. segment of the insula circular sulcus	6.9	0.009
CT	Group x Gender	Right	lat. orbital sulcus	6.4	0.01
CSA	Group x Age x Gender	Right	superior frontal	6.2	0.01
CSA	Group x Age x Gender	Right	orbital sulcus	5.2	0.02
CSA	Group x Age x Gender	Left	inferior frontal	4.7	0.03
CSA	Group x Age x Gender	Right	pars opercularis	4.6	0.03
CT	Group x Age	Right	pars orbitalis	4.5	0.03
CT	Group x Age x Gender	Left	pars triangularis	4.3	0.04
CT	Group x Gender	Right	orbital sulcus	3.9	0.05

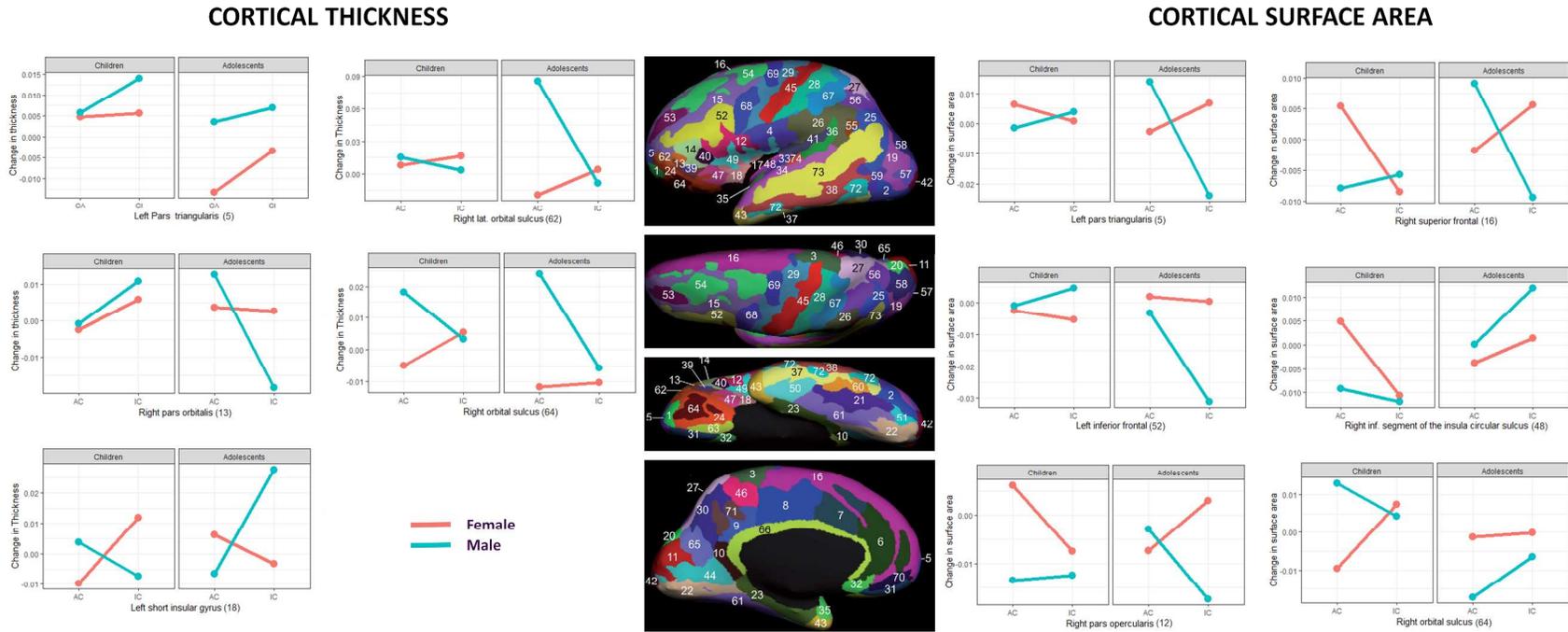
**Table 3. Statistical results of the linear models for the association of relative changes in IC efficiency and PFC anatomy change (cortical thickness [CT] and cortical surface area [CSA] of PFC regions) after training.** Only PFC regions with group-specific changes after training were analyzed. The results are reported in decreasing order of significance. Cog: Relative change in IC composite scores.

<b>Morphometric feature</b>	<b>Factor in the linear model</b>	<b>Side</b>	<b>PFC Regions</b>	<b>F-value</b>	<b>p-value</b>
CSA	Cog x Group x Age x Gender	left	pars triangularis	7.4	0.007
CSA	Cog x Group x Age	right	orbital sulcus	6.2	0.01
CT	Cog	right	pars orbitalis	5.8	0.02
CSA	Cog x Age x Gender	left	pars triangularis	4.6	0.03
CSA	Cog x Group x Age x Gender	right	pars opercularis	4.4	0.04

## Inhibition, training and neuroplasticity



**Figure 1. Relative change in IC composite scores from pre- to posttraining sessions in the IC and the AC training groups in children and adolescents, stratified by gender.** Error bars correspond to standard error. A negative relative change in IC composite scores reveals IC efficiency improvement from pre- to posttraining sessions.



**Figure 2. Relative change in prefrontal cortical thickness (CT) and cortical surface area (CSA) from pre- to posttraining sessions in the IC and the AC training groups in children and adolescents, stratified by gender.** Numerical indices (indicated between brackets after region names under each interaction graph) refer to the anatomical regions of the Destrieux atlas of cortex anatomy (represented on the middle panel). Anatomical regions of Destrieux atlas are represented on lateral, superior, inferior and medial inflated views of the parcellation of a left hemisphere, adapted from Destrieux et al., 2010.





## **Étude des effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur sur le développement cognitif et les apprentissages scolaires chez l'enfant : étude comportementale et en IRM.**

**RÉSUMÉ :** Quotidiennement, pour choisir une action tout en s'adaptant de manière flexible à notre environnement nous devons utiliser des processus cognitifs de haut niveau appelés : les fonctions exécutives. Il existe trois fonctions exécutives principales : le contrôle inhibiteur, la mémoire de travail et la flexibilité cognitive. Ces fonctions exécutives sont impliquées dans toutes les activités cognitives et dans toutes les interactions sociales. Elles constituent également un prédicteur dans la réussite scolaire et professionnelle. Ces fonctions exécutives se développent de l'enfance jusqu'à l'âge adulte en lien avec la maturation cérébrale du cortex préfrontal. Étant donné leur rôle dans le développement cognitif et les apprentissages scolaires de nombreuses études ont tenté de déterminer (a) dans quelle mesure des entraînements permettent d'améliorer les capacités exécutives des enfants, des adolescents et des jeunes adultes et (b) dans quelle mesure améliorer les capacités exécutives à des effets bénéfiques pour d'autres capacités cognitives (transfert lointain). Si certaines études ont démontré des effets d'entraînements ciblés à la mémoire de travail, au contrôle inhibiteur ou à la flexibilité cognitive et des transferts potentiels dans des tâches non entraînées, il existe encore peu d'études sur les effets comportementaux d'un entraînement au contrôle inhibiteur chez les enfants d'âge scolaire et sur les mécanismes de neuroplasticité qui sous-tendent les améliorations potentielles des capacités d'inhibition. Dans cette thèse nous avons adopté une méthodologie expérimentale classique en psychologie des apprentissages pour évaluer les effets comportementaux et les effets sur la structure cérébrale (épaisseur corticale, surface, gyrification) d'un entraînement à l'inhibition de 5 semaines sur tablette. Soixante enfants de 9 à 10 ans ont donc participé à un prétest (Évaluation cognitive-1 et IRM-1), ont suivi un entraînement de 5 semaines, 15 minutes par jour, 5 jours par semaine à la maison (sur tablette tactile), et un posttest immédiat (à la fin de l'entraînement, Évaluation cognitive-2 et IRM-2). Nous avons comparé deux groupes d'enfants: un groupe entraîné au contrôle inhibiteur (groupe expérimental : Stroop et stop-signal) et un groupe entraîné à répondre à des questions de vocabulaire et de culture générale (groupe contrôle actif). Nous avons analysé (1) les effets de transfert proche et lointain induit par l'entraînement cognitif dans les deux groupes d'enfants, (2) la réceptivité à l'entraînement, c'est-à-dire : le taux de progression et l'influence de la motivation tout au long de l'entraînement sur les effets de transfert, et enfin (3) les changements macroscopiques observés au niveau anatomique chez les enfants et des adolescents suite à ces entraînements.

**Mots-clés :** contrôle inhibiteur, entraînement, développement, IRM, plasticité cérébrale, enfants, apprentissages scolaires.

## **Study of the effects of inhibitory control training on cognitive development and school learning in children: a behavioural and MRI study**

**ABSTRACT :** Every day, to choose an action while adapting flexibly to our environment we have to use high-level cognitive processes called executive functions. There are three main executive functions: inhibitory control, working memory and cognitive flexibility. These executive functions are involved in all cognitive activities and social interactions. They are also a predictor of academic and professional success. These executive functions develop from childhood to adulthood in relation to the cerebral maturation of the prefrontal cortex. Given their role in cognitive development and school learning, many studies have attempted to determine (a) the extent to which training improve the executive abilities of children, adolescents, and young adults, and (b) to what extent improving executive abilities is beneficial for other cognitive abilities (far transfer). While some studies have demonstrated that working memory, inhibitory control or cognitive flexibility training produce near and far transfers, there are still a limited number of studies that investigated the behavioural effects of training inhibitory control in school-aged children and the neuroplasticity mechanisms that underlie potential improvements in inhibitory control abilities. In our study, we used an experimental method classically used in educational psychology to evaluate the effects on behavioral and on the brain structure (cortical thickness, surface area, gyrification) of a 5 weeks inhibition training on tablet. Sixty children from 9 to 10 years of age participated in a pretest (cognitive assessment-1 and MRI-1), followed by a 5-week training, 15 minutes a day, 5 days a week at home (on tablet), and to an immediate post-test (at the end of the training, Cognitive Assessment-2 and MRI-2). We compared two groups of children: a group in which inhibitory control was trained (experimental group: Stroop and stop-signal) and a group that was trained to answer vocabulary and general knowledge questions (active control group). We analyzed (1) the effects of near and far transfer induced by the cognitive training in both groups of children, (2) the receptivity to training, that is to say: the rate of progression and the influence of the motivation throughout the training on the transfer effects, and finally (3) the macroscopic changes observed at the anatomical level following these trainings in children and adolescents.

**Key words :** inhibitory control, training, development, aMRI, brain plasticity, children, school learning