



HAL
open science

Étude de l'activité neuro-oscillatoire thêta en tant que marqueur développemental dans l'évaluation d'un entraînement écologique du contrôle cognitif chez l'enfant

Nicolas Adam

► **To cite this version:**

Nicolas Adam. Étude de l'activité neuro-oscillatoire thêta en tant que marqueur développemental dans l'évaluation d'un entraînement écologique du contrôle cognitif chez l'enfant. Neurosciences [q-bio.NC]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2020. Français. NNT : 2020TOU30067 . tel-03021928

HAL Id: tel-03021928

<https://theses.hal.science/tel-03021928>

Submitted on 24 Nov 2020

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Présentée et soutenue par

Nicolas ADAM

Le 20 mai 2020

**Étude de l'activité neuro-oscillatoire thêta en tant que marqueur
développemental dans l'évaluation d'un entraînement écologique
du contrôle cognitif chez l'enfant**

Ecole doctorale : **CLESCO - Comportement, Langage, Education, Socialisation,
Cognition**

Spécialité : **Neurosciences, comportement et cognition**

Unité de recherche :

CERCO - Centre de Recherche Cerveau et Cognition

Thèse dirigée par

Chloé FARRER et Agnès BLAYE

Jury

M. Sylvain MOUTIER, Rapporteur
M. Arnaud ROY, Rapporteur
Mme Sandrine ROSSI, Rapporteuse
M. Yves Chaix, Examineur
Mme Chloé FARRER, Directrice de thèse
Mme Agnès BLAYE, Co-directrice de thèse



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Présentée et soutenue par

Nicolas ADAM

Le 20 mai 2020

**Étude de l'activité neuro-oscillatoire thêta en tant que marqueur
développemental dans l'évaluation d'un entraînement écologique
du contrôle cognitif chez l'enfant**

Ecole doctorale : **CLESCO - Comportement, Langage, Education, Socialisation,
Cognition**

Spécialité : **Neurosciences, comportement et cognition**

Unité de recherche :

CERCO - Centre de Recherche Cerveau et Cognition

Thèse dirigée par

Chloé FARRER et Agnès BLAYE

Jury

M. Sylvain MOUTIER, Rapporteur
M. Arnaud ROY, Rapporteur
Mme Sandrine ROSSI, Rapporteur
M. Yves Chaix, Examineur
Mme Chloé FARRER, Directrice de thèse
Mme Agnès BLAYE, Co-directrice de thèse

Remerciements

Chloé. Merci pour votre bienveillance, votre optimisme, votre attention. Au cours de cette thèse vous avez su faire preuve de beaucoup d'humanité et voir l'homme derrière le doctorant. Cela a été crucial. Je vous en remercie. Par ailleurs merci de votre investissement au cours de ces longs mois d'intervention dans les écoles. Parfois j'ai la nostalgie de cette époque et des galettes, brioches, tartes et gâteaux en tout genre qui agrémentaient notre quotidien. Merci enfin de m'avoir offert tant d'opportunités. Je garderai en mémoire un souvenir chaleureux de mon encadrement de thèse. Merci pour cela.

Agnès. Je sais à quel point, cela a dû être compliqué pour vous de codiriger une thèse d'aussi loin et avec si peu d'interactions directes. Mais je vous remercie d'avoir accepté la situation, d'avoir manifesté votre intérêt pour le travail tout au long de cette thèse, d'avoir gardé un œil expert et critique, et d'avoir su rebondir et suivre ce travail malgré l'irrégularité de nos échanges. Cela m'a beaucoup aidé. Merci de votre pertinence, votre rigueur, votre pédagogie et merci pour vos disponibilités au cours de ces échanges matinaux.

Rasa. Without you, I would never have succeeded in completing this work. Rasa, thank you for all this time, all the efforts you made to transmit to me a part of your knowledge and your immense expertise. You accompanied me over the course of a whole year in the EEG processing and analysis, in doing so, you saw me in my moments of total despair as well as in moments dominated by the euphoria of the first results. Anyway, you always knew how to be positive and pedagogue. Thank you very much.

Sylvain. Merci pour votre aide et votre pédagogie au cours de ce travail. Cela a été très rassurant de pouvoir bénéficier d'une expertise comme la vôtre.

Les écoles. Merci aux directrices, maîtresses, personnel des écoles de Léo Ferré et VilleBourbon de Montauban. Vous avez facilité le travail au plus haut point, nous permettant de rencontrer les enfants dans les meilleures conditions possibles, assurant la communication avec les parents, aménageant vos temps de classe pour nous permettre de réaliser nos protocoles. J'ai rencontré des équipes exceptionnelles qui nous ont accueillis à bras ouverts et intégré dans leur environnement. Merci à ces personnes entières et investies, ayant à cœur la réussite et le bon développement de leurs élèves.

Le CerCo. Merci à ceux qui ont su porter une oreille attentive à mes questions lorsque je leur ai posé. Merci à chacun d'avoir su entretenir ma curiosité scientifique et diversifier mes domaines d'intérêt au travers de conversations

riches et exaltantes. Merci à ceux qui m'ont permis de dépasser ma simple perspective de doctorant névrosé. Merci aux membres du CerCo de m'avoir permis de gagner en assurance et en maturité au cours de cette aventure palpitante et effroyable qu'est la thèse. Merci aussi au SITH pour leur aide dans la conception du matériel, des programmes mais aussi dans les requêtes du quotidien. Merci Carmen pour ton sourire chaleureux, pour ta bienveillance et cette aura maternelle et réconfortante qui te caractérise.

Les amis. Je crains d'en oublier. 'Merci' à mes anciens collègues thésards de Lyon qui m'ont poussé à me lancer dans une thèse "C'est bien une thèse" qu'ils disaient. Mais merci quand même d'avoir été là à ce moment et d'être resté dans ma vie. Merci aux Toulousains passés et présents : Damien, Marie, Cécile, Mehdi, Sasskia, Simon, Yseult. Vous avez contribué grandement au maintien de ce qu'il reste de mon équilibre psychique. Je vous en remercie. Merci aussi à mes amis mayennais et du reste du Mi-Nord, vous retrouver lors de mes remontées au Pays a été à chaque fois une bonne bouffée d'air me permettant de revenir d'attaque.

La famille. Merci pour le soutien indéfectible de ma famille. Lorsque j'ai postulé pour la thèse vous m'avez encouragé bien que sachant que cela signifiait m'éloigner pendant encore au moins trois ans. Grâce à vous j'ai eu la force de m'investir dans ce projet et de le mener à bien. Papa, Maman, cette thèse je vous la dédie. Voyez ce que vous m'avez permis de faire. Vous êtes des personnes extraordinaires. Merci aussi à mes sœurs, beaux-frères, neveux et nièces pour leur présence et leurs encouragements.

Kévin. Merci pour le soutien que tu m'as apporté, pour m'avoir toujours écouté me plaindre dans mes moments au fond du trou, pour m'avoir supporté même lorsque l'épuisement et l'anxiété ont ôté toute trace de propos cohérents de ma bouche et de mon esprit et lorsque les oiseaux ont presque eu raison de moi. Merci, d'avoir été là, d'être là et d'avoir signé pour que cela continue ad vitam aeternam...

Et enfin, ceux qui m'ont inspiré tout au long de ce périple : Dr Sheldon Cooper & Dr Amy Farrah fowler, Dr Temperance Brennan, Dr Ross Geller et Dr Brett Montgomery. Sans oublier Maître Ellie Torres, la thérapeute Fiona Wallace, la Suprême Fiona Good ainsi que la très humble «
feue » Daenerys du Typhon de la Maison Targaryen, L'Imbrulée, Première du nom, Reine de Meereen, Reine des Andals, de Rhoynar et des Premiers Hommes, Suzeraine des Sept Couronnes et Protectrice du Royaume, Khaleesi de la Grande Mer Herbeuse, Mère des Dragons, Briseuse de chaînes. Sans vous, qui sait, j'aurais peut-être perdu pied.

“Do not train children to learn by force or harshness;
but direct them to it by what amuses their minds,
so that you may be better able to discover with accuracy
the peculiar bent of the genius of each.”

Platon

Étude de l'activité neuro-oscillatoire thêta en tant que marqueur développemental dans l'évaluation d'un entraînement écologique du contrôle cognitif chez l'enfant

Dans cette thèse nous testons l'hypothèse qu'au travers de l'autorégulation mise en œuvre au cours du jeu de faire semblant, il est possible d'entraîner les processus de traitement du contrôle cognitif et ainsi d'accélérer son développement. Cette thèse intègre une approche originale visant à appréhender les effets de l'âge et les effets de l'entraînement sur les mêmes mesures cérébrales et cognitives du contrôle cognitif. Nous nous intéressons à mettre en évidence des marqueurs comportementaux et électro physiologiques du développement du contrôle cognitif au travers d'une tâche de conflit chez des enfants d'âge scolaire et préscolaire. Nous utilisons ensuite ces marqueurs auprès d'enfants d'âge préscolaire, pour caractériser les effets consécutifs d'un entraînement écologique du contrôle cognitif au moyen de la même tâche d'évaluation. Nous avons mis en évidence qu'au travers d'une tâche de gestion de conflit à différents niveaux d'interférence, l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire thêta permettait de caractériser la dynamique d'engagement du contrôle ainsi que l'intensité du conflit généré. Par ailleurs la latence de cette activité renseigne sur la maturation des réseaux sous-jacents. Ces résultats soulignent également l'intérêt d'appréhender le contrôle cognitif au travers de la gestion d'interférence pour caractériser finement les processus de traitement sous-jacents à son engagement. Les performances témoignent d'une amélioration des processus de traitement du contrôle cognitif avec l'âge tant au niveau comportemental que neuronal. Il semble que les enfants plus âgés soient davantage aptes à mettre en œuvre des compétences de surveillance et gestion du conflit avec l'âge. En revanche les résultats observés lors de la seconde évaluation chez les enfants d'âge préscolaire suggèrent une adaptation dans l'implémentation du contrôle. L'entraînement améliore la maturité du jeu de faire semblant. Cependant, les mesures plus générales du contrôle cognitif ou d'autorégulation ne montrent aucun bénéfice pour le groupe expérimental en comparaison du groupe contrôle. Enfin nos résultats viennent compléter les connaissances actuelles sur la gestion de conflit lors de l'enfance.

Mots clés : *Contrôle cognitif, Développement, Entraînement, Autorégulation, Gestion de conflit, Oscillations thêta*

Study of theta neuro-oscillatory activity as a developmental marker in the evaluation of an ecological training of cognitive control in children

In this thesis, we test the hypothesis that through the self-regulation implemented during the pretend play, it is possible to train the processes of cognitive control processing and thus accelerate its development. This thesis integrates an original approach aimed at understanding the effects of age and the effects of training on the same cognitive and cognitive measures of cognitive control. We are interested in highlighting behavioral and electrophysiological markers of the development of cognitive control through a conflict task in school and preschool children. We then use these markers with preschool children to characterize the effects of ecological cognitive control training using the same assessment task. We have demonstrated that through a conflict management task with different levels of interference, the amplitude of theta neuro-oscillatory activity allowed to characterize the control engagement dynamics as well as the intensity of the generated conflict. In addition, the latency of this activity provides information on the maturation of the underlying networks. These results also underline the interest of understanding cognitive control through interference management to characterize finely the processing treatment underlying its implementation. The performances suggest an improvement of the processes of treatment of the cognitive control with the age both at the behavioral and neuronal level. Older children seem to be better able to implement conflict management and monitoring skills. On the other hand, the results observed during the second evaluation in preschool children suggest an adaptation in the implementation of the control. Training improves the maturity of pretend play skills. However, more general measures of cognitive control or self-regulation show no benefit for the experimental group compared to the control group. Finally, our results enrich current knowledge on conflict management in childhood.

Key words: *Cognitive control, Development, Training, Self-regulation, Conflict management, Theta oscillations*

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	4
TABLE DES MATIERES	9
ABRÉVIATIONS	12
I. INTRODUCTION GENERALE	13
II. INTRODUCTION THÉORIQUE	18
A. PRÉSENTATION DU CONTRÔLE COGNITIF	18
1. DÉFINITION	18
2. LES COMPOSANTES DU CONTRÔLE COGNITIF	20
a) Inhibition	20
b) Mémoire de travail (Maintien et Mise à jour)	21
c) Flexibilité	22
3. VISION UNITAIRE VERSUS DISSOCIÉE	22
4. LA GESTION DU CONFLIT	23
a) Définition de la notion de conflit	23
b) Interférence stimulus-réponse : Effet de compatibilité	24
c) Interférence de task-set : Effet de reconfiguration	25
d) Interférences dans la tâche cœur fleur	26
e) La théorie de supervision du conflit	28
B. DÉVELOPPEMENT DU CONTRÔLE COGNITIF	31
1. CARACTÉRISTIQUES DE DÉVELOPPEMENT	31
a) Précoce	31
b) Progressif	32
Développement de la gestion de conflit à la période préscolaire	33
c) Soumis à des influences environnementales	35
Statut Socio-Économique	35
L'environnement domestique	36
Les compétences parentales	37
2. RÔLE ET IMPLICATION DU CONTRÔLE COGNITIF DANS LA PÉRIODE PRÉSCOLAIRE	38
a) Contrôle cognitif & apprentissages	38
b) Contrôle cognitif & relations interpersonnelles	39

c) Contrôle cognitif & autorégulation	40
3. CORRÉLATS NEURONAUX ET CÉRÉBRAUX DU DÉVELOPPEMENT EXÉCUTIF	42
a) Aires corticales impliquées dans le contrôle cognitif	43
b) L'EEG : outil d'investigation du développement du contrôle cognitif chez l'enfant	46
c) Potentiels évoqués comme marqueurs du contrôle cognitif	48
d) Rôle des oscillations thêta	51
C. ENTRAÎNEMENT DU CONTRÔLE COGNITIF	54
1. DÉFINITION	54
2. INTÉRÊTS	54
3. BÉNÉFICES	55
4. CRITÈRES D'EFFICACITÉ	56
a) Dosage : Durée, Intensité & Fréquence	56
b) Contenu : Complexité, Originalité & Diversité	57
5. APPROCHES D'ENTRAÎNEMENT	60
a) Entraînement basé sur les processus : une approche focale	60
b) Entraînement stratégique : une approche transversale	62
c) Entraînement écologique : une approche globale	63
Le jeu de faire semblant	65
6. MÉCANISMES NEUROCOGNITIFS EN JEU DANS L'ENTRAÎNEMENT	73
D. AXES DE RECHERCHE	88
III. PARTIE EXPÉRIMENTALE	92
<hr/>	
A. PRÉAMBULE MÉTHODOLOGIQUE	92
1. PARTICIPANTS	92
2. MESURES	93
a) Mesures EEG	97
B. ÉTUDE TRANSVERSALE	101
1. INTRODUCTION	101
2. MATÉRIEL & MÉTHODES	102
3. RÉSULTATS	103
4. DISCUSSION	107
5. CONCLUSION	108
6. ARTICLE DE CHAPITRE	109
C. ÉTUDE MICROGÉNÉTIQUE	138
1. INTRODUCTION	138
2. MATÉRIEL & MÉTHODES	139

3. RÉSULTATS	141
4. DISCUSSION	144
5. CONCLUSION	146
6. ARTICLE DE CHAPITRE	146
<u>IV. DISCUSSION GÉNÉRALE</u>	177
A. RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA THÈSE	177
B. IDENTIFICATION DE MARQUEURS DU DÉVELOPPEMENT LIÉ À L'ÂGE	180
C. APPLICATION DES MARQUEURS DÉVELOPPEMENTAUX DANS L'ÉVALUATION D'UN D'ENTRAÎNEMENT	184
D. LIMITES ET RECOMMANDATIONS	193
<u>V. CONCLUSION</u>	196
<u>VI. PERSPECTIVES</u>	197
<u>VII. RÉFÉRENCES</u>	200
<u>VIII. ANNEXES</u>	I
A. OUTILS D'ÉVALUATION MENTIONNÉS	I
B. TABLEAU DE SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS ISSUE D'UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LE JEU DE FAIRE SEMBLANT ET LES APPROCHES D'ENTRAÎNEMENT ÉCOLOGIQUES	IV
C. MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRES À L'ARTICLE ADAM ET AL., 2020	VIII

ABRÉVIATIONS

FES : Fonctions exécutives

TR : Temps de réponse

PRC : Pourcentage de réponse correct

SES : Statut économique et social

TOM : Tools of the Mind (Les outils de la pensée, Bodrova & Leong, 2007)

PIAFEx : Programa de Intervenção em Autorregulação e Funções Executivas (Programme d'intervention sur l'autorégulation et les fonctions exécutives, Dias & Seabra, 2016)

TDAH : Trouble de déficit de l'attention avec ou sans Hyperactivité

MDT : Mémoire de travail

SAS : Système attentionnel superviseur

SRC : Stimulus-Response Compatibility

CCA : Cortex cingulaire antérieur

CPF : Cortex préfrontal

CPFDL : Cortex préfrontal dorso-latéral

EEG : Electroencéphalogramme

MFT : Mid-frontal thêta

ERPs : Potentiels évoqués

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

NIRS : Near-infrared spectroscopy

TEP : Tomographie par Émission de Positrons

AIC : Akaike Information Criterion

SD : Déviation standard

GLM : modèle linéaire général

GLMer : modèle linéaire général à effet randomisé

Lmer : modèle linéaire à effet randomisé

I. INTRODUCTION GENERALE

Au cours de la période préscolaire les compétences permettant à l'enfant d'exercer du contrôle sur son comportement se développent rapidement. L'observation dans les cours de récréation est un moyen intéressant de constater l'évolution du contrôle cognitif et d'apprécier la rapidité à laquelle l'enfant évolue au sein d'un laps de temps très court. Pour de très jeunes enfants, il est difficile de gérer les conflits. Prenons l'exemple du jeu « Jacques a dit ». Dans ce jeu l'enfant doit exécuter une consigne uniquement si elle est précédée de « Jacques a dit », dans tout autre cas il doit ignorer cette consigne. Les enfants de maternelle jouent beaucoup à ce jeu qui représente un intérêt de par la complexité qu'il représente. Les enfants sont bien souvent incapables de s'empêcher de suivre l'instruction, ou encore s'engagent dans une réflexion profonde afin de prendre la décision de suivre l'ordre. On constate donc l'effort fourni par l'enfant pour réaliser une tâche qui, quelques années plus tard, est totalement maîtrisée.

Les compétences sur lesquelles repose le contrôle cognitif sont multiples et se développent de manière progressive au cours de l'enfance. La période préscolaire s'avère être une période cruciale au cours de laquelle l'enfant devient de plus en plus efficace à exercer un contrôle sur ses actions et ses représentations mentales. Ce développement va de pair avec une complexification des demandes environnementales, les apprentissages, les responsabilités ou les échanges avec ses pairs sont autant de contextes stimulant les compétences de contrôle et favorisant leur renforcement.

Le contrôle cognitif est impliqué au travers de nombreuses activités de la vie quotidienne. Pendant l'enfance, les compétences du contrôle sont fortement sollicitées au cours des apprentissages élémentaires. Les mathématiques ou l'apprentissage de la lecture nécessitent de mettre en œuvre des compétences fondamentales du contrôle cognitif. Par exemple, lorsqu'il commence à lire l'enfant doit être capable de maintenir en mémoire les syllabes déchiffrées

pendant qu'il poursuit la lecture des syllabes suivantes. Au fur et à mesure qu'il avance dans le mot il met à jour sa représentation mentale du mot, puis de la phrase. Ces apprentissages sont complexes et leur réussite dépend de l'efficacité des compétences sous-jacentes (i.e. maintien en mémoire, direction de l'attention, résistance à la distraction, alternance entre les représentations). Aussi, lorsque ces compétences sont faibles, l'enfant risque de se retrouver en situation de difficulté, voire d'échec scolaire.

Certains facteurs peuvent être délétères au bon développement du contrôle cognitif (i.e. prématurité, statut économique et social, troubles développementaux, ...). Afin de prévenir un retard de développement des compétences de contrôle il est possible d'agir en mobilisant ces compétences de manière précoce. En effet, ces compétences ont l'avantage d'être très sensibles à la stimulation surtout lors de la période préscolaire. Cela repose sur le phénomène de maturation en œuvre au cours de cette période. La partie du cerveau qui gère ces compétences, majoritairement le cortex préfrontal, est en pleine structuration. Les réseaux s'organisent, les voies de traitement se précisent et la communication neuronale devient plus efficace. Des études ont ainsi observé qu'en sollicitant une compétence de manière répétée il est possible d'obtenir des bénéfices à la fois sur cette compétence mais également sur une activité reposant sur cette compétence (i.e. la lecture). L'entraînement permettrait de compenser un retard de développement en générant un cadre artificiel propice à la mise en œuvre des mécanismes neurocognitifs associés à la maturation.

Cependant la majorité des études ayant évalué les bénéfices cérébraux d'entraînements ciblant les compétences de contrôle reposent sur des activités réalisées en laboratoire ou en milieux contrôlés. Ces environnements ont l'avantage d'isoler concrètement les mécanismes neuronaux impactés par les entraînements. Néanmoins, on peut remettre en cause l'écologie de ces approches qui ne correspondent pas à des activités « naturellement » mises en œuvre au cours du développement. Aussi, il serait intéressant de comparer les résultats et connaissances issus de ces travaux pour apprécier les bénéfices neuronaux d'approches plus écologiques. Parmi celles-ci, dans ce travail, nous nous intéressons au jeu de « faire semblant » reconnu pour mettre largement en œuvre les compétences du contrôle cognitif.

Cette thèse présente une approche originale visant à utiliser une même tâche pour appréhender d'une part les effets « classiques » du développement du contrôle cognitif et d'autre part, les effets d'un entraînement écologique, sur le développement du contrôle cognitif. Dans ce travail, nous avons évalué et entraîné des enfants au sein même des écoles afin de recueillir des mesures dans un contexte écologique. Nous utilisons des mesures cérébrales et neurocognitives pour tenter de caractériser les mécanismes neuronaux de l'entraînement écologique. Nous nous appliquerons donc à répondre aux questions suivantes : est-ce que l'autorégulation mise en œuvre au cours du jeu de faire semblant permet d'entraîner les processus de traitement du contrôle cognitif ? Et si oui, ces effets sont-ils assimilables à ceux du développement classique, autrement dit, l'entraînement permet-il d'accélérer le développement ?

Le second objectif, plus pratique, concerne la problématique générale de l'inégalité des chances à l'école, déterminée en partie par le milieu social et économique dans lequel évolue l'enfant. Il existe de multiples façons d'appréhender cette problématique. La perspective que nous avons adoptée, de notre point de vue neuroscientifique, a été de se pencher plus particulièrement sur un des médiateurs de cette réussite scolaire : le contrôle cognitif. Ce travail repose sur la mise en place d'une intervention facilement transposable dans les écoles permettant d'entraîner ce contrôle cognitif. Les bénéfices d'une telle intervention permettraient de réduire l'écart développemental existant entre les enfants les plus défavorisés, possédant généralement des aptitudes de contrôle cognitif moins développées, versus les enfants plus privilégiés plus capables de mobiliser efficacement leurs compétences de contrôle. La réduction de l'écart du développement de ces compétences avant l'entrée à l'école primaire vise à réduire les inégalités dans la réussite scolaire. La démarche consiste à faire en sorte que chaque enfant dispose d'un niveau de développement suffisant de ces compétences de contrôle pour favoriser son immersion dans les apprentissages fondamentaux.

La définition du contrôle cognitif, tel que nous l'avons étudié, fait l'objet d'un premier chapitre théorique. Celui-ci présente les compétences sous-jacentes à

l'implémentation du contrôle cognitif et précise plus en détail un des rôles du contrôle cognitif : la gestion du conflit cognitif. Nous introduisons également la notion d'interférence en précisant l'intérêt que représentent les paradigmes d'interférence dans l'étude du contrôle cognitif.

Au cours du développement les compétences sur lesquelles reposent la gestion de conflit cognitif s'améliorent et le niveau de contrôle cognitif mobilisé lors d'une situation d'interférence est amené à évoluer. C'est cette dynamique de développement qui est présentée lors du deuxième chapitre théorique. Les facteurs influençant ce développement ainsi que le rôle du contrôle cognitif au cours de l'enfance, notamment la période préscolaire sont également introduits. L'amélioration des compétences du contrôle cognitif est abordée sous deux angles. Premièrement, l'angle comportemental, les trajectoires développementales des performances comportementales à la tâche cœur-fleur, tâche utilisée au cours de nos études, sont particulièrement développées. Le second angle concerne le développement des corrélats cérébraux et neuronaux du contrôle cognitif et plus spécifiquement de la gestion de conflit, issues d'études en imagerie et en électrophysiologie.

La partie introductive de cette thèse se terminera avec un troisième chapitre théorique concernant l'entraînement du contrôle cognitif. L'entraînement fait l'objet d'un engouement important dans les domaines des neurosciences et de la psychologie. Nous synthétisons dans cette partie dans un premier temps les connaissances issues de travaux empiriques sur les critères d'efficacité de l'entraînement, l'intérêt que comporte l'entraînement du contrôle cognitif ainsi que la méthode d'évaluation des entraînements. Dans un second temps, un intérêt particulier est accordé à la distinction des différentes approches d'entraînements (Bryck & Fisher, 2012; Karbach, 2015). Cette partie présente de façon synthétique les résultats principaux issus de la littérature chez l'enfant d'âge préscolaire et présente plus précisément, pour chacune des approches identifiées, les études ayant permis d'avancer dans la compréhension des mécanismes neuronaux liés à ces différents entraînements. Enfin, nous présentons la littérature sur l'entraînement écologique au travers du jeu de faire semblant.

La partie expérimentale de cette thèse, s'ouvre avec un quatrième chapitre se présentant comme un préambule méthodologique. Pour étudier les effets du développement classique sur les performances et les corrélats neuronaux au travers de la tâche cœur-fleur, une première étude transversale est réalisée. Celle-ci donne lieu au cinquième chapitre du manuscrit. Cette étude consiste en l'évaluation et la comparaison de données (performances cognitives et activité neuronale) obtenues pour deux groupes d'âge. Les grands points de l'étude sont brièvement résumés en français et accompagnés de la publication scientifique associée à paraître dans la revue *Developmental Science* (acceptée le 15/12/2019).

Les effets du développement liés à l'entraînement sont étudiés au travers d'une seconde étude microgénétique ciblant des enfants de moyenne et de grande section de maternelle faisant l'objet d'un sixième chapitre. Un programme d'entraînement basé sur le jeu de faire semblant est réalisé sur quatre mois. L'intervention est précédée et suivie d'une phase d'évaluation. Les mesures obtenues sur un groupe expérimental sont comparées à celles recueillies sur un groupe contrôle actif. Les résultats obtenus lors de cette étude sont interprétés au regard des résultats de l'étude transversale et de la littérature. L'étude est elle aussi résumée en français et associée à un article en cours de préparation (prochainement proposé à *Trends in Neuroscience and Education*).

Au cours du chapitre sept nous mettons en perspective ces résultats au travers de la discussion générale. Nous confrontons nos résultats à ceux observés dans la littérature avant d'y apporter un regard critique et d'en extraire des recommandations pour les travaux à venir. Après avoir conclu sur ce travail, une partie perspective développe le projet vers lequel je m'oriente personnellement à l'issu de ce doctorat.

II. INTRODUCTION THÉORIQUE

A. PRÉSENTATION DU CONTRÔLE COGNITIF

1. Définition

Le contrôle cognitif a été largement étudié au travers des champs disciplinaires de la psychologie du développement, de la psychologie cognitive ou des neurosciences. Cependant, le terme se confond bien souvent avec les notions de fonctions exécutives, de contrôle exécutif, d'autorégulation ou de contrôle volontaire. Il demeure difficile d'en trouver une définition qui fasse consensus entre, et parfois au sein même, de ces différents champs de recherche. Malgré des divergences d'opinion la majorité des auteurs s'entendent sur une définition fonctionnelle selon laquelle le contrôle cognitif permet de réguler ou d'adapter de manière flexible notre comportement au moyen de plusieurs fonctions, dans l'objectif de satisfaire aux exigences d'une situation complexe et/ou non-familière. Ainsi, dans un contexte nouveau, dès lors qu'une opération ne peut être effectuée au moyen de traitements automatiques (mis en place par exemple au travers de l'expérience et de la répétition), le contrôle cognitif intervient permettant d'élaborer un plan d'action original et produire une conduite adaptée. Le contrôle cognitif est théorisé comme étant le fondement cognitif sur lequel repose les compétences de régulation à des niveaux variés (physiologique, attentionnel, émotionnel, comportemental, cognitif, interpersonnel ou social) de façon orientée vers un but à travers le temps et à travers des contextes changeants (Calkins & Fox, 2002; P. Karoly, 1993).

La métaphore couramment utilisée consiste à envisager le contrôle cognitif comme le chef d'orchestre qui guide, coordonne et régule un ensemble de processus. Nous le décrivons comme un mécanisme de gestion de processus cognitifs (maintenance de but, résolution de conflit, résistance ou suppression d'information distractives, surveillance d'erreur,...) permettant de réguler, coordonner et de séquencer les actions et pensées afin de fournir un comportement adapté par rapport à un but interne (Todd S Braver, 2012). Deux

notions doivent être mises en avant lorsque l'on parle de contrôle cognitif : i) **le but**, qui va déterminer la nature des processus impliqués dans le traitement permettant une réponse adaptée et ii) **l'adaptation**, qui sous-tend la notion de choix sélectif parmi des traitements alternatifs (Clark et al., 2016).

Parmi les premiers modèles qui décrivent les compétences de contrôle, celui de Norman & Shallice (Norman & Shallice, 1986) postulait l'existence d'un système attentionnel superviseur (SAS) permettant de gérer les situations non-routinières, soit les conflits, des situations non-associées à des schémas d'action. Selon ce modèle, lorsqu'une instance nommée "gestionnaire de conflit" est capable de gérer une situation, elle inhibe les schémas d'action concurrents, le schéma adéquat est alors activé et la réponse peut être donnée. Lorsque ce gestionnaire ne possède pas de script lui permettant de fournir une réponse, un système de supervision, le SAS, va alors prendre le relais et adapter stratégiquement les schémas à disposition. Cette dualité dans la mise en œuvre des traitements cognitifs est l'essence même de la notion de contrôle. Ridderinkhof & van der Molen (Ridderinkhof & van der Molen, 1995) ainsi que De Jong (de Jong, 1995) définissent ces voies de traitement et distinguent i) une voie directe activée de manière préférentielle permettant des réponses rapides et ii) une voie indirecte, activée dans le cas où le traitement opéré par la voie directe ne permettrait pas de satisfaire aux exigences de la tâche.

Un autre modèle, développé par Braver et collaborateurs (Braver, Reynolds, & Donaldson, 2003) définit deux modes de contrôle qui varient en termes de dynamique d'engagement du contrôle cognitif. Un contrôle appelé réactif, qui se met en place en réponse à une interférence et implique une réactivation des représentations latentes ; et un mode de contrôle appelé proactif, où le contrôle est maintenu afin de garder actives et accessibles les représentations nécessaires à la réalisation de l'action et ainsi optimiser la performance. Le mode de contrôle proactif est plus coûteux car il nécessite une supervision et la mise en œuvre de traitements supplémentaires. De fait, il n'intervient que dans certaines situations où la survenue d'un conflit est prédictible, comme par exemple dans des tâches d'alternance qui présentent de manière aléatoire différentes conditions.

2. Les composantes du contrôle cognitif

Le contrôle cognitif repose sur la sollicitation de composantes sous-jacentes, les fonctions exécutives (FEs) (Miyake et al., 2000). Selon l'approche choisie par les auteurs, le contrôle cognitif est d'ailleurs considéré soit comme un mécanisme unitaire (Duncan & Owen, 2000; Duncan & Miller, 2002) soit comme un ensemble de fonctions séparées, les FEs. Dans son modèle Diamond (Adele Diamond, 2013) décrit trois fonctions exécutives centrales : la flexibilité, l'inhibition et la mémoire de travail, ainsi que d'autres fonctions, de plus haut niveau, fruits de la combinaison des fonctions centrales, plus basiques. Ces fonctions de plus haut niveau viennent enrichir les compétences à disposition dans la résolution d'une tâche non-routinière (planification, organisation, raisonnement, résolution de problème). Néanmoins, des analyses factorielles confirmatoires s'intéressant aux performances obtenues au travers d'une large batterie de tests impliquant le contrôle cognitif identifient les trois fonctions centrales comme les composantes principales du contrôle cognitif (Miyake et al., 2000; Miyake & Friedman, 2012).

a) Inhibition

Des analyses factorielles confirmatoires ont montré que l'inhibition, aussi appelée contrôle inhibiteur, était la fonction la plus largement mobilisée au sein des traitements nécessaires à la réalisation d'un ensemble varié de tâches exécutives (Miyake & Friedman, 2012). L'inhibition correspond à un contrôle attentionnel, comportemental, émotionnel et réflexif qui permet de dépasser un comportement de réponse automatique, conditionné ou impulsif au profit d'un comportement approprié à la situation (Adele Diamond, 2013). Elle intervient pour résoudre une situation conflictuelle impliquant plusieurs réponses possibles (Holmboe & Johnson, 2005). Néanmoins, il est difficile d'obtenir des mesures pures de l'inhibition. En effet les tâches complexes font généralement intervenir d'autres fonctions comme la mémoire de travail. L'inhibition est susceptible d'intervenir à plusieurs niveaux : i) au niveau cognitif, elle permet d'inhiber les interférences générées par les pensées ou les expériences passées par exemple lors d'une prise de décision ; ii) au niveau attentionnel, appelée aussi attention exécutive, l'inhibition gère les processus attentionnels focalisés et sélectifs. Elle permet d'orienter son attention vers une ou plusieurs

sources en inhibant les interférences environnementales pouvant susciter un déplacement attentionnel exogène ; iii) au niveau comportemental, l'autocontrôle (ou 'self-control') permet de régir son propre comportement ainsi que ses émotions afin de résister aux tentations et de ne pas agir de manière impulsive (Adele Diamond, 2013).

b) Mémoire de travail (Maintien et Mise à jour)

La mémoire de travail (MDT) permet de retenir pendant un court moment et de traiter de l'information mentalement sans accès perceptif direct (A. D. Baddeley & Hitch, 1994; E. E. Smith & Jonides, 1999). Cela implique de pouvoir à la fois retenir et manipuler l'information (M J Kane & Engle, 2002). Elle intervient dans la compréhension du langage, la planification, la résolution de problème ou encore dans des tâches faisant appel à l'intelligence fluide (i.e. (Cowan et al., 2005; A. Miyake & Shah, 1999). Selon le modèle de Baddeley (Baddeley, 2012), on distingue la MDT verbale reposant sur l'implémentation de la boucle phonologique, de la MDT non-verbale, ou visuo-spatiale reposant sur l'implémentation du calepin visuo-spatial. Ces deux aspects sont en réalité, des sous-systèmes dits "esclaves" coordonnés par un système supérieur appelé administrateur central. En fonction de la nature de la tâche et de l'opération à réaliser, l'administrateur central sollicitera un des deux sous-systèmes. Le calepin visuo-spatial permet de stocker de manière temporaire un certain nombre d'information, ce nombre d'information correspond à l'empan mnésique. La boucle phonologique, quant à elle, permet d'accroître le temps de rétention et la taille de l'empan au travers d'une stratégie de répétition. Pour évaluer la MDT visuo-spatiale, reposant sur des représentations mentales non verbalisables (i.e. figure de Rey, tâches de type "blocs de corsi"). Pour la MDT verbale, des stratégies basées sur l'utilisation du langage peuvent être utilisées, il s'agit en général de tâches de rappel à l'endroit ou à l'envers (Bull et al., 2008). Les processus d'inhibition interviennent dans la manipulation de l'information en MDT empêchant les informations non-pertinentes d'entrer en mémoire de travail (Conway & Engle, 1994; Diamond, 2002; Kane & Engle, 2000). L'inhibition intervient également dans la compétence de mise à jour, souvent associée à la MDT, en faisant sortir de la MDT, les infos devenues non-

pertinentes par rapport aux exigences de la tâche et au but maintenu actif (Miyake & Shah, 1999).

c) Flexibilité

La flexibilité cognitive correspond à la capacité de basculer entre plusieurs perspectives, représentations, tâches, stratégies ou comportements (Chevalier, 2010).

Avant de poursuivre sur la présentation de la flexibilité, il convient d'introduire et de définir un nouveau concept, celui de task-set¹. Le task-set renvoie à un ensemble de paramètres associés à une tâche : représentations, consignes, buts et réponses. L'activation d'un task-set permet au sujet de mettre en place un paramétrage spécifique à la tâche en question afin d'en faciliter le traitement (Sakai, 2008). La flexibilité repose ainsi sur l'inhibition d'un task-set et le chargement en mémoire de travail d'un nouveau task-set, à cela s'ajoute la capacité de pouvoir passer de l'un à l'autre ("switching" en anglais), toujours dans l'optique de fournir un comportement qui soit adapté (Adele Diamond, 2013).

Chez les enfants, la flexibilité est classiquement étudiée au moyen de la tâche Dimensional Change Card Sort (DCCS) ou encore la tâche du Wisconsin card sorting (WCS). Lors de ces tâches les sujets doivent trier des images bidimensionnelles selon l'une ou l'autre de leurs dimensions en fonction de la règle exigée pour l'essai courant (Frye, 1995; Zelazo et al., 2003). La flexibilité permet de basculer d'un task-set vers un autre task-set sans persévérer, c'est-à-dire de ne pas continuer de répondre d'après le task-set précédent.

3. Vision unitaire versus dissociée

Bien que le contrôle cognitif repose sur la sollicitation des trois FEs principales, ces dernières sont généralement mobilisées conjointement au travers d'un ensemble de tâches exécutives (Miyake & Friedman, 2012). L'impureté des mesures obtenues lors de l'évaluation des fonctions exécutives au moyen de

¹ Bien que la désignation de task-set soit un terme anglais, celui-ci ne possède pas d'équivalent francophone efficace, c'est pourquoi au sein de ce document le terme anglophone sera employé.

ces tests est une limite fréquemment mise en avant au sein de cette littérature et de ce champs d'étude (Clark et al., 2016; Miyake et al., 2000). Face à cette critique, la vision unitaire du contrôle cognitif comme mécanisme de gestion semble plus adaptée. Cette perspective autorise d'appréhender les traitements du contrôle cognitif par rapport aux processus de traitement sous-jacents et non au travers de la (des) fonction(s) sollicitée(s). Elle permet de distinguer les processus et les stratégies à l'origine d'un comportement et de restituer de façon plus interprétative les performances notamment dans le cadre d'études développementales (Andersen, 2003).

4. La gestion du conflit

Au cours de ce travail nous avons choisi d'étudier l'efficacité du contrôle cognitif au travers d'un de ses aspects centraux : la gestion de conflit². Après avoir défini la notion de conflit, nous présenterons de manière précise les interférences à l'origine des effets de conflit que nous avons étudié au cours de ce travail, puis nous présenterons le modèle de supervision du conflit.

a) Définition de la notion de conflit

Le conflit est un événement interne lié au traitement de deux informations discordantes ou à l'activation simultanée de deux voies de traitement distinctes. Il est mesurable en termes de coût sur la performance. Ce conflit est généré par l'activation d'une information ou d'une réponse non pertinente, source d'interférence compte tenu du but visé. Les tâches d'interférence ont l'avantage de permettre de faire varier le niveau de contrôle cognitif engagé dans la résolution du conflit. Pour contrôler les processus de traitement impliqués dans une tâche ainsi que la nature des conflits générés, les chercheurs peuvent faire varier le chevauchement dimensionnel entre stimulus et/ou réponse (Kornblum & Lee, 1995).

² Au sein de ce travail la notion de « conflit » renvoie au conflit cognitif.

Nous allons nous intéresser à deux de ces chevauchements dimensionnels que nous désignons sous le terme d'interférences : l'interférence stimulus-réponse et l'interférence de task-set.

b) Interférence stimulus-réponse : Effet de compatibilité

L'interférence Stimulus-Réponse fait référence à un chevauchement dimensionnel entre le Stimulus et la réponse. La tâche prototypique permettant d'étudier cette interférence est la tâche de Simon (Simon, 1969). Dans cette tâche (illustrée en figure 1), le conflit repose sur un chevauchement d'une dimension non pertinente du stimulus (sa latéralité) avec la réponse à donner. La résolution du conflit sous-tend ainsi une inhibition des processus d'amorçage de la réponse associée à la voie directe qui repose sur une tendance dominante à presser la touche présenter du même côté que le stimulus (Egner et al., 2007; Praamstra et al., 1999; Stürmer et al., 2005; Stürmer & Leuthold, 2003).

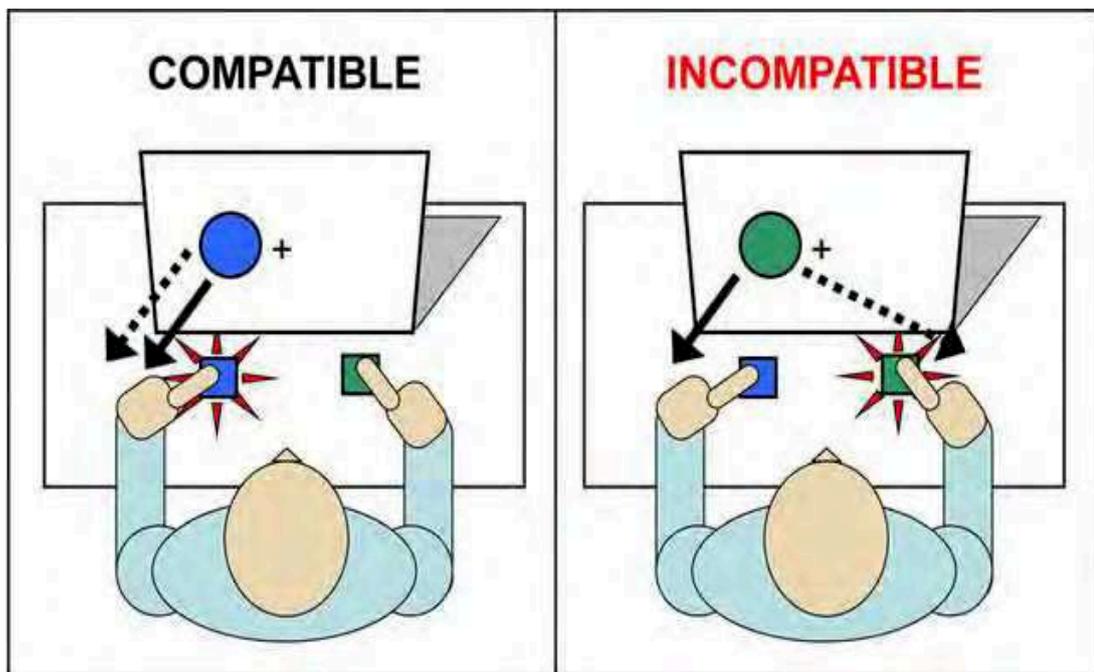


Figure 1. Illustration de l'interférence Stimulus-Réponse au cours de la tâche de Simon. Le stimulus apparaît aléatoirement à droite ou à gauche (dimension non pertinente). Le sujet doit répondre par rapport à la couleur du stimulus (à gauche si le stimulus est bleu ou à droite s'il est vert). La flèche pleine illustre la tendance automatique de réponse et la flèche en pointillés la réponse attendue par rapport aux exigences de la tâche. (D'après van den Wildenberg et al., 2010)

Ce traitement saillant peut être lié à un effet de latéralité (tendance préférentielle à répondre en indiquant le même côté que le côté d'apparition du stimulus), à une règle apprise, ou à la prédominance d'un traitement sur un autre (Barber & Carter, 2005). Le traitement additionnel lié à la gestion de cette interférence génère un coût en termes de performance appelé effet de compatibilité (ou effet de congruence ou de correspondance). Les temps de réponse (TR) sont classiquement plus longs et le pourcentage de réponse correcte (PRC) plus faible lorsque la réponse est spatialement incompatible avec la position du stimulus (incompatibilité stimulus-réponse) que lorsque la position du stimulus et de la réponse à donner sont compatibles.

c) Interférence de task-set : Effet de reconfiguration

L'interférence de task-set repose sur un effet de reconfiguration (ou compatibilité séquentielle), c'est-à-dire que le task-set activé à l'essai précédent est différent de celui en jeu dans l'essai courant (Egner, 2007). On retrouve cette interférence dans les tâches de reconfiguration, communément appelé *task-switching* ou alternance de tâches (Barber & Carter, 2005; Bouquet et al., 2013; Hirsch et al., 2018; Kiesel et al., 2010). Cette interférence implique l'inhibition du task-set précédent ainsi qu'une reconfiguration pour activer le task-set pertinent sur l'essai courant. Elle induit de retenir en MDT au moins deux task-sets (comme illustré en figure 2). Dans cette tâche les task-sets sont indiqués par des amorces sous formes de mots. Le sujet apprend successivement à maîtriser les conditions '*Shape*' (prendre en compte la dimension forme du stimulus pour répondre) et '*Color*' (prendre en compte la dimension couleur pour répondre). Puis, un bloc lui est proposé dans lequel il doit alterner les task-sets entre les essais (de manière prévisible ou imprévisible). On comprend que, dans les interférences de task-set, moins les capacités à se désengager du task-set précédemment activé sont importantes, plus le conflit est élevé. Les essais concernés par une interférence de task-set sont associés à un coût de traitement (TR et PRC) connu sous le nom de coût d'alternance ("*switch cost*" en anglais).

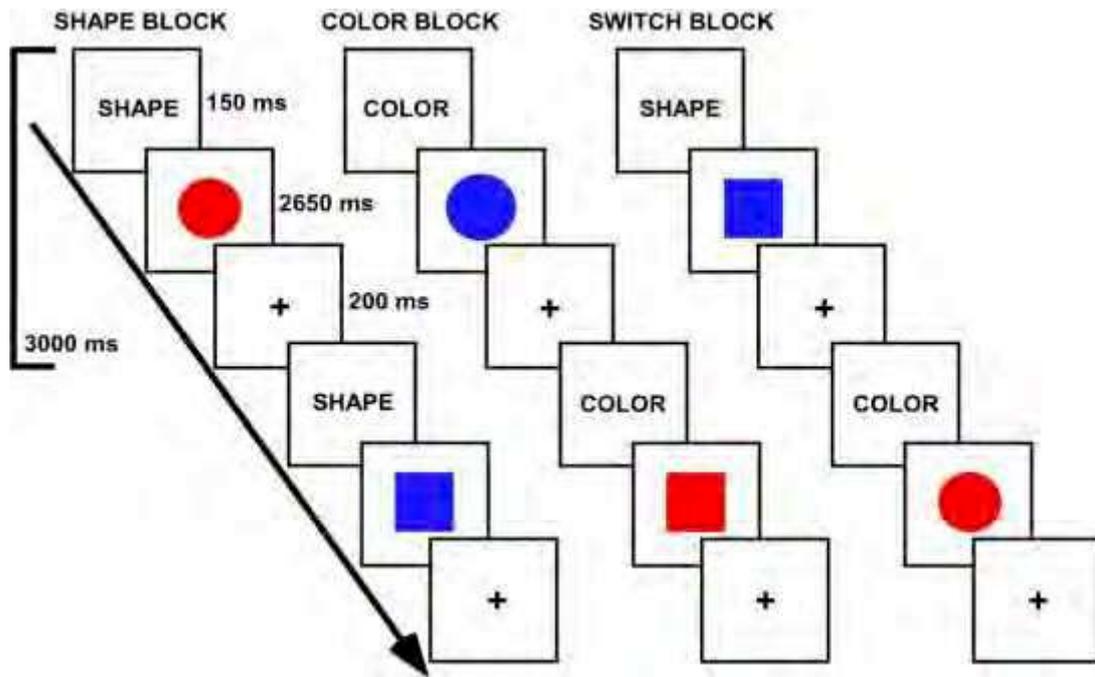


Figure 2. Design expérimental d'une tâche d'alternance où le sujet doit alterner entre deux task-sets : un associé à la dimensions « forme » du stimulus, l'autre associé à la « couleur » du stimulus et défini par une amorce. Les task-sets sont présentés d'abord séparément au cours des deux premiers blocs, puis s'alternent lors du troisième bloc. (D'après Gold, Kim, Johnson, Kryscio, & Smith, 2013)

d) Interférences dans la tâche cœur fleur

La tâche cœur-fleur (Davidson et al., 2006; Adele Diamond et al., 2007) s'inscrit dans la famille des paradigmes de compatibilité stimulus-réponse classiquement utilisés pour l'étude du contrôle cognitif chez l'enfant (Zhang et al., 1999). Cette tâche (illustrée en figure 3) est initialement composée de trois blocs de passation. Un premier bloc en modalité compatible, sans interférence, où seuls les cœurs seront présentés. Il est demandé au participant de presser le bouton latéralement situé du même côté que le stimulus (cœur). Un deuxième bloc en modalité incompatible. Dans celui-ci, les stimuli sont des fleurs. Les participants doivent répondre en pressant le bouton latéralement situé du côté opposé au stimulus. Et enfin un troisième bloc, mixte, où les deux modalités sont présentées de manière aléatoire. Les participants doivent prendre en compte les deux dimensions du stimulus : sa localisation (droite ou gauche) et sa forme (cœur ou fleur). Les sujets répondent en appuyant sur l'un des deux boutons de réponse latéralisés (disposés dans le même arrangement spatial que les stimuli). Chacune des formes est associée à sa propre règle (cœur :

presser le bouton situé du même côté que le cœur ; fleur : presser le bouton situé du côté opposé à la fleur).

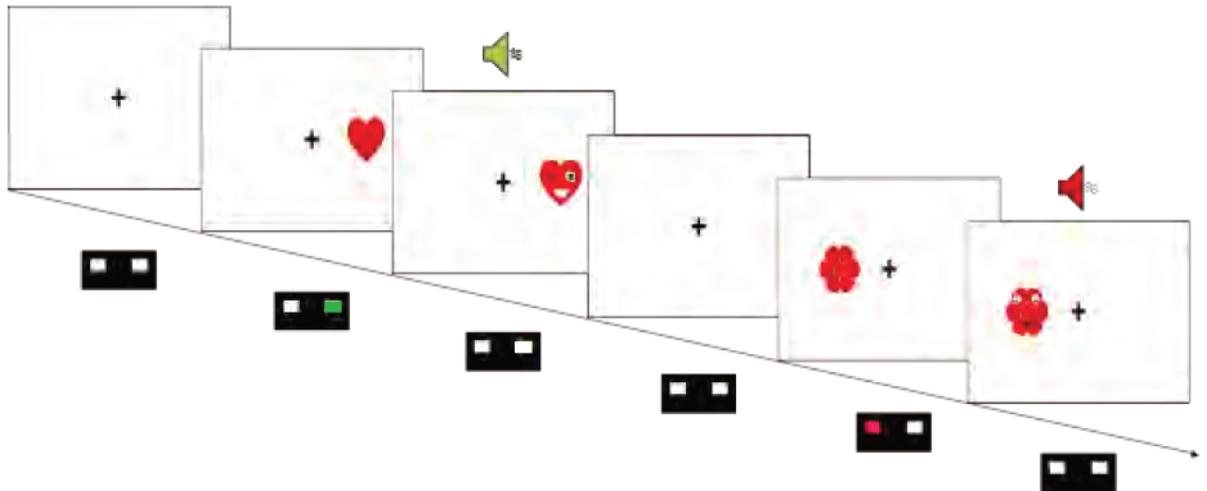


Figure 3. Illustration d'une séquence d'essais mettant en jeu une interférence Stimulus-Réponse sur l'essai courant (fleur) et une interférence de task-set entre l'essai courant et l'essai précédent. Dans cet exemple le sujet a bien répondu à la condition compatible (feedback positif) mais s'est trompé à l'essai incompatible (feedback négatif)

Dans ce bloc mixte interviennent les deux interférences présentées précédemment. Le sujet est alors confronté à des essais associés à une règle dominante impliquant une réponse compatible avec la localisation du stimulus (C) et des essais associés à une règle non dominante impliquant une réponse incompatible avec la localisation du stimulus (I), illustrant l'interférence de stimulus-réponse. Par ailleurs, des effets de séquence sont aussi présents dans cette tâche induisant l'interférence de task-set. Lors des deux séquences d'essais cl et iC^3 , les représentations activées pour la résolution de l'interférence lors de l'essai précédent peuvent interférer dans le traitement de l'essai courant. Notons également le cas particulier de la condition cl qui cumule les deux interférences : interférence stimulus-réponse sur l'essai courant et interférence de task-set suite au changement de task-set entre l'essai courant et l'essai précédent.

³ Dans cette dénomination par convention on utilise une lettre minuscule pour symboliser l'essai précédent et une lettre majuscule pour symboliser l'essai courant. On s'intéresse à (aux) interférence(s) mise(s) en jeu dans l'essai courant d'une séquence de 2 essais.

e) La théorie de supervision du conflit

Pour être traité, le conflit a d'abord besoin d'être détecté. C'est sur ce constat que plusieurs auteurs se sont appuyés pour développer la théorie de gestion du conflit et présumer l'existence d'une fonction de supervision du conflit (*conflict monitoring* en anglais; (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001; Botvinick, Cohen, & Carter, 2004; Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter, & Cohen, 1999; Carter, 1998; MacDonald, 2000). D'après cette théorie, une compétence permettrait de détecter les situations générant du conflit. Pour ce faire ce système va opérer des ajustements stratégiques des processus exécutifs afin de surmonter le conflit et limiter son impact (coût) sur la performance et ainsi garantir un comportement optimal (Botvinick et al., 2004; Cohen, Botvinick, & Carter, 2000; Hanslmayr et al., 2008). Détection du conflit et mise en œuvre du contrôle cognitif seraient des processus intrinsèquement liés. En effet, lorsqu'un conflit est détecté, le niveau de contrôle est renforcé de sorte à mobiliser les processus de traitement nécessaires à sa gestion et permettre une réponse adaptée tout en limitant le coût en termes de performances. Par conséquent selon cette théorie de la supervision du conflit, dans une tâche de conflit, le niveau de contrôle cognitif fluctue de manière dynamique au cours d'une tâche. Il est élevé pendant les essais qui suivent un essai générant du conflit. En revanche, le niveau de contrôle est plus faible pendant les essais qui suivent un essai ne générant pas de conflit et qui n'entraîne donc pas de régulation à la hausse du contrôle cognitif (i.e. Töllner et al., 2017). Au niveau comportemental cela a beaucoup été étudié au travers de l'effet séquentiel de congruence (Gratton et al., 1992). Il s'agit d'un effet d'interaction entre la compatibilité de l'essai précédent et courant. L'effet de compatibilité est moindre après un essai incompatible (essai il), que lorsqu'il suit un essai compatible (essai ci). Il en résulte une hiérarchie dans la complexité des essais (observée chez l'adulte) déterminant les essais cC et ci comme respectivement ceux associés aux TR les plus courts et les plus longs. Les TR aux essais il et iC se situeraient à un niveau de performance intermédiaire (Clayson & Larson, 2011; Egner, 2007; Gratton et al., 1992; Notebaert et al., 2006). De façon générale les données provenant d'études neurophysiologiques ou de neuro-imagerie tendent à corroborer le modèle de

supervision de conflit de Botvinick et collaborateurs en montrant une activation accrue des aires cérébrales impliquées respectivement dans le traitement du conflit au cours des essais conflictuels et dans la surveillance de conflit (Botvinick et al., 2001; Burle, Allain, Vidal, & Hasbroucq, 2005; Kerns, 2006; Notebaert et al., 2006; Shitova, Roelofs, Schriefers, Bastiaansen, & Schoffelen, 2017). Ces études permettent d'appréhender plus finement les mécanismes en jeu dans les différents conflits.

POINTS CLÉS

- ☞ Au quotidien, le contrôle cognitif est sollicité dans de multiples contextes. Il permet de réguler nos pensées et nos actions dans les situations non routinières
- ☞ Le contrôle cognitif est mis en œuvre afin de permettre l'atteinte d'un but tout en prenant en compte les contraintes de la situation
- ☞ Le contrôle cognitif peut être vu comme un mécanisme unitaire reposant sur la mise en œuvre de différents processus cognitifs (mise à jour, maintien actif, inhibition de réponse automatique, suppression de distraction, surveillance de conflit, ...)
- ☞ Il y a conflit lorsque deux voies de réponse sont activées par un même événement. Pour dépasser l'interférence et limiter la dégradation de la performance dans le processus de réponse, le contrôle cognitif est implémenté de manière plus importante
- ☞ Le niveau de contrôle cognitif engagé dans la gestion d'un conflit peut varier en fonction des processus de traitement mobilisés par l'interférence. Plus l'interférence concerne des traitements automatisés plus le contrôle sera mobilisé pour dépasser le conflit.

B. DÉVELOPPEMENT DU CONTRÔLE COGNITIF

Le développement du contrôle cognitif, de l'enfance à l'âge adulte, est caractérisé par un gain d'efficacité. Cela se traduit par de meilleures aptitudes à mettre en œuvre les différentes composantes exécutives au service d'un but. Nous décrivons donc au cours de cette partie la dynamique développementale du contrôle cognitif, son implication dans le quotidien et la vie d'un enfant ainsi que les différents facteurs susceptibles d'influer sur son développement. Puis, dans un deuxième temps, nous aborderons les bases cérébrales et les mécanismes neuronaux en jeu dans son développement.

1. Caractéristiques de développement

a) Précoce

Dès 6 mois, un bébé est capable de manifester les prémices d'un contrôle cognitif. C'est ce que Diamond et collaborateurs ont mis en évidence au travers de la tâche A-non-B (Adele Diamond, 1990). Dans cette tâche, l'expérimentateur évalue si l'enfant persévère dans une tâche de recherche d'objet, ou bien si, au contraire, il est capable de modifier son schéma d'action pour atteindre son but. Avec un bébé, cette évaluation consiste à présenter un objet attractif puis le dissimuler sous un cache A. L'expérimentateur introduit un deuxième cache. Une fois l'association entre l'objet et le premier obstacle renforcée, l'expérimentateur dissimule l'objet sous le deuxième cache. Alors que les jeunes nourrissons persévèrent à rechercher l'objet sous le cache A, dès 6 mois (dans des conditions optimales) ils parviennent à inhiber la tendance à rechercher l'objet là où ils l'ont trouvé la première fois, pour aller le chercher sous le cache B. Cette tâche permet ainsi de mettre en évidence les prémices du contrôle cognitif (inhibition d'un comportement moteur inadéquat et maintien actif d'un but pendant la réalisation d'une tâche). Ces résultats ont été répliqués, notamment au travers d'autres tâches (évaluant principalement des aspects d'inhibition), les études montrent qu'en effet, dès les premiers mois de vie, des capacités basiques de régulation sont à l'œuvre chez le bébé (Bell & Fox, 1992; Orekhova et al., 1999; Stroganova et al., 1999).

b) Progressif

Le développement du contrôle cognitif n'est pas linéaire (Garon et al., 2008; Wiebe et al., 2011). Les composantes sur lesquelles le contrôle cognitif repose, les FEs, se développent de manière asynchrone (Adele Diamond, 2013). La différenciation des FEs se produit progressivement au cours de l'enfance traduisant une compétence de plus en plus fine à implémenter le contrôle cognitif. Pendant la période préscolaire, des compétences basiques vont peu à peu apparaître, gagner en efficacité et se conjuguer, aboutissant à l'émergence des trois fonctions centrales présentées précédemment. Ce développement repose sur deux principales périodes : avant 3 ans, période pendant laquelle émergent les compétences basiques (i.e. maintien en mémoire, attention sélective, délai dans la réponse, ...) et après 3 ans, période de coordination des compétences basiques (Garon et al., 2008). Des analyses factorielles confirmatoires conduites sur des enfants de 2 à 6 ans viennent appuyer les suggestions de Garon et collaborateurs (2008) quant à une construction progressive des FEs au cours de l'enfance. En effet, ces analyses ont montré que jusqu'à 5 ans, un modèle à un facteur unique permettait le mieux d'expliquer les performances obtenues à une batterie de tâches mobilisant le contrôle cognitif (Bull et al., 2011; Hughes et al., 2010; Wiebe et al., 2008). A partir de 5 ans, un modèle à deux facteurs semblerait expliquer le contrôle cognitif au travers de deux fonctions : une première fonction d'inhibition-switching (processus indifférenciés) et une seconde fonction de mise à jour (Lee et al., 2013; St Clair-Thompson & Gathercole, 2006; Van der Ven et al., 2012). Cependant en fonction des études, les composantes exécutives identifiées divergent (Huizinga et al., 2006; Sébastien Monette et al., 2015; van der Ven et al., 2013). Il semblerait que les tâches choisies ainsi que les indicateurs de performance pris en considération impactent les résultats des analyses factorielles confirmatoires (Lerner & Lonigan, 2014; M. R. Miller et al., 2012). C'est à partir de 15 ans que les analyses démontrent une séparation clairement définie entre les trois FEs principales (Lee et al., 2013, voir cependant certains travaux qui établissent un modèle tripartite bien plus tôt dans le développement (Sébastien Monette et al., 2011; Rose et al., 2011)). On retient donc qu'au fur et à mesure du développement l'enfant sollicite de façon de plus en plus

différencié les aptitudes à disposition afin de s'adapter au contexte et pour assurer l'efficacité d'un comportement.

Ainsi, la littérature démontre à la fois que les tâches exécutives sollicitent de manière conjointe l'ensemble des FEs, mais aussi que ces FEs ne sont clairement différenciées qu'à partir du milieu de l'adolescence. Cependant, l'enfant d'âge préscolaire est capable de mettre en œuvre du contrôle cognitif, même dans des tâches complexes reconnues pour impliquer l'ensemble des FEs. Il est donc pertinent de s'intéresser aux compétences sur lesquelles reposent ces performances au cours de l'enfance et notamment lorsque le contrôle cognitif repose sur la mise en œuvre d'une fonction unique versus plusieurs fonctions. Afin d'étudier comment ce processus de différenciation progressif des FEs affecte l'efficacité de la mise en œuvre du contrôle, plusieurs auteurs ont utilisé des tâches de conflit (Crone, Bunge, et al., 2006; Davidson et al., 2006). Ces tâches permettent de solliciter de manière intense le contrôle cognitif et de mieux discerner les changements liés à l'âge au sein des différents processus de traitement mise en œuvre (Braver & West, 2008; Fabiani, Friedman, & Cheng, 1998).

Développement de la gestion de conflit à la période préscolaire

Davidson et collaborateurs ont étudié de manière transversale, depuis l'enfance jusqu'à l'âge adulte, les performances obtenues à la tâche Dots⁴ (Davidson et al., 2006; Adele Diamond et al., 2007). La tâche Dots, comme la tâche cœur-fleur, est une tâche complexe faisant intervenir à la fois des effets compatibilité liés à la dominance d'une règle par rapport à une autre règle, ainsi que des effets de séquence liés à l'alternance entre ces deux règles. Il en résulte ainsi une combinaison de conflits liés à l'interaction de ces différents effets qui font intervenir des processus de traitement variés dont il est intéressant d'étudier le développement au cours de l'enfance.

⁴ Pour précision la tâche Dots a été utilisée par Davidson et collaborateurs en 2006. C'est de cette tâche que la tâche Coeur-Fleur (Diamond et al., 2007), que nous étudions largement dans cette introduction, s'inspire. La particularité de la tâche cœur-fleur par rapport à la tâche Dots est d'avoir des stimuli plus ludiques et de permettre plus aisément la mise en œuvre de la mémoire de travail verbale chez les enfants qui peuvent associer le nom des stimuli à une règle.

Les auteurs montrent qu'à tout âge, la condition mixte de la tâche Dots, faisant intervenir à la fois l'interférence Stimulus-Réponse et l'interférence de task-set, s'avère la plus complexe. Cette condition est également la plus susceptible de laisser apparaître des différences de performances liées à la maturation des processus de contrôle cognitif (au niveau des temps de réponse, de la précision et du taux de réponses anticipées). Un effet de compatibilité est reporté chez les enfants les plus jeunes. Il a été démontré que l'effet de compatibilité diminuait avec l'âge pour atteindre un niveau comparable à celui de l'adulte entre la sixième et la dixième année de vie, avec un développement rapide du contrôle cognitif de 6 à 7 ans (par exemple Cao et al., 2013; Davidson et al., 2006). D'autres études ont montré que les performances des enfants lors de tâches d'alternance ne s'approchent pas de celles observées à l'âge adulte avant l'âge de 9 ans (voir jusqu'à 15 ans relativement au paradigme utilisé) (Bunge & Wright, 2007; Chevalier et al., 2013; Crone, Bunge, et al., 2006; Huizinga & van der Molen, 2011; Wendelken et al., 2012). Crone et collaborateurs suggèrent que chez les enfants, par rapport aux adultes, l'association stimulus-réponse précédemment activée serait plus difficile à abandonner générant un coût supplémentaire lié à la réactivation du task-set latent (Crone, Bunge, et al., 2006). Lorsque le maintien de task-set est plus performant, un effet de facilitation automatique peut être observé. L'essai courant n'induit pas de reconfiguration par rapport à l'essai précédent. Cette facilitation automatique (réduction du temps de réponse et meilleure précision) est consécutive du fait que l'association Stimulus-Réponse déjà activée lors de l'essai précédent, soit encore active et disponible (Soetens et al., 1985).

Le contexte de gestion de conflit est donc un cadre propice à l'évaluation du développement du contrôle cognitif et à la compréhension des modifications intervenant dans le traitement d'interférence au cours la période préscolaire. Période pendant laquelle on sait que les processus sous-jacents à la gestion d'interférence évoluent rapidement.

c) Soumis à des influences environnementales

Statut Socio-Économique

Le développement du contrôle cognitif est influencé par des facteurs environnementaux (i.e. santé physique, milieu de vie, pauvreté, scolarisation précoce,...), particulièrement au cours de l'enfance (Hoff et al., 2003). Nombre de ces facteurs sont corrélés au statut socio-économique (SES) qui intervient donc comme un prédicteur important de l'ensemble des FE (Farah, 2017; Noble, McCandliss, & Farah, 2007; Noble, Norman, & Farah, 2005 pour méta-analyse voir Lawson & Farah, 2017) et cela dès la première année de vie (Lipina et al., 2005). Le SES réfère à la position relative d'un individu, d'une famille ou d'un groupe au sein d'une société hiérarchisée par rapport à son accès ou de son pouvoir sur des biens évalués comme la santé, la reconnaissance sociale ou les privilèges (McLoyd, 1998). Le SES est généralement mesuré au moyen de plusieurs indicateurs comme le niveau d'étude, la profession, le salaire ou encore le quartier de résidence (Currie et al., 2000). Un SES évalué comme étant bas, est en général lié à des stimulations environnementales moins riches (au niveau lexical, culturel et social, ou encore au niveau de l'interaction avec l'environnement, (Bradley et al., 2001)).

En 2016, Johnson et collaborateurs isolent un des aspects du SES et réalisent une revue des études publiées au cours des 5 années précédentes sur l'impact de la pauvreté sur le développement cérébral (S. B. Johnson et al., 2016). Ils pointent les conséquences du niveau de pauvreté sur le développement structurel et fonctionnel du cerveau au cours de l'enfance en ciblant, les aires cérébrales les plus sensibles aux influences environnementales impliquées notamment, dans les processus de régulation. Ils établissent ainsi un modèle (illustré en figure 4) qui détermine les mécanismes par lesquels la pauvreté génère des conséquences neurocognitives et cela au travers de différents facteurs environnementaux associés au SES.

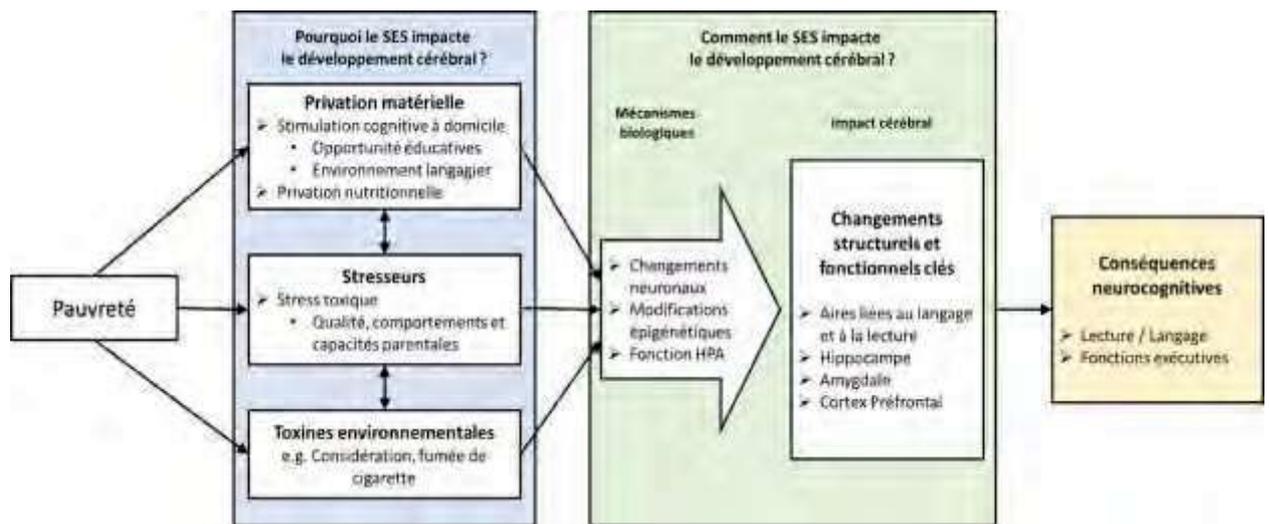


Figure 4. Modèle de Johnson et collaborateurs établissant les mécanismes par lesquels la pauvreté induit des conséquences neurocognitives à l'origine de la difficulté scolaire. (D'après Johnson et al., 2016)

Dans ce modèle, la pauvreté est caractérisée par trois aspects i) la privation matérielle, un moindre accès aux ressources éducatives, à la richesse culturelle, à la stimulation cognitive ; ii) la confrontation à des stresseurs (pratiques parentales, cadre de vie, habitudes de vie) ; et à des toxines environnementales (pollution, fumée de cigarette, ...). Ces facteurs induisent des conséquences premièrement biologiques, c'est-à-dire qu'ils modulent le fonctionnement du corps (au niveau neuronal, épigénétique, endocrinologique,...), des conséquences qui à leur tour vont impacter le développement cérébral d'un point de vue structurel et fonctionnel ayant finalement des répercussions sur les compétences académiques (lecture et langage), mais aussi sur les fonctions exécutives (S. B. Johnson et al., 2016).

L'environnement domestique

Comme nous l'avons évoqué un peu plus tôt, le SES est défini par nombre de facteurs corrélés les uns aux autres. Au-delà de la pauvreté, Vernon-Feagans et collaborateurs (2016) se sont intéressés à l'effet de l'environnement domestique au travers d'un indicateur de « chaos domestique » traduisant un cadre de vie bruyant, désorganisé et instable (Vernon-Feagans et al., 2016). Les auteurs révèlent l'impact prédominant et particulièrement délétère que le chaos domestique enduré lors des trois premières années de vie entraîne sur

le niveau de fonctionnement des FEs et des comportements d'autorégulation mesurés à la fin de l'âge préscolaire. Les résultats indiquent cependant que ces effets du chaos domestique sur i) l'efficacité des FEs à l'âge de 3 ans et ii) le développement des FEs entre 3 et 5 ans sont médiées par un autre facteur : les compétences parentales, notamment la réceptivité et l'ajustement des parents aux besoins de l'enfant ainsi que la bienveillance.

Les compétences parentales

Les compétences parentales (ou pratiques parentales) peuvent aussi avoir un impact délétère sur le développement cérébral et neurocognitif (Hackman et al., 2010; S. B. Johnson et al., 2016). Les pratiques parentales s'avèrent corrélées au SES (Steele et al., 2016). Leur impact est crucial sur le développement du contrôle cognitif et cela dès le plus jeune âge (Blair et al., 2014; Meuwissen & Carlson, 2015). On sait que les expériences vécues par les enfants avec leurs parents/éducateurs jouent un rôle important dans le développement du cerveau (Bos et al., 2009; Carlson, 2009) particulièrement de la partie frontale du cerveau (Goldberg, 2002). De nombreux programmes soutenant les compétences parentales et/ou mobilisant leur implication dans le développement cognitif de leur(s) enfant(s) ont ainsi été développés (Lakes et al., 2009; Lane et al., 2016; Neville et al., 2013) révélant même un rôle de modérateur de l'implication parentale sur les bénéfices de l'intervention (Neville et al., 2013). Parmi les aspects majoritairement visés par les interventions ciblant le développement du contrôle cognitif apparaissent : i) le soutien (être en position d'étayage et apporter l'aide suffisante à l'enfant sans excès) et ii) le contrôle de l'autonomie (favoriser le sentiment de maîtrise de l'enfant, respecter son rythme, donner la possibilité de faire ses propres choix, éviter le directivité) (Bernier et al., 2010, 2012; Fay-Stammach et al., 2014; Sethi et al., 2000). L'environnement ainsi créé procure à l'enfant des expériences positives, sur des situations de résolutions de problèmes par exemple, qu'il pourra intégrer dans son répertoire stratégique. De plus, cela encourage la réflexion et la prise de décision. Autant de compétences mobilisant le contrôle cognitif et impliquées dans l'autorégulation (Duckworth, 2011; Duckworth, Stepaha, & Carlson, 2015; Lyons & Zelazo, 2011). Pour finir, donner les moyens aux parents (ou

éducateurs) de soutenir les compétences d'autorégulation de leurs enfants peut permettre à ces enfants de ré axer leur trajectoire de développement sur le modèle d'une trajectoire plus prometteuse au niveau académique en stimulant l'enthousiasme pour l'éducation et la mise en place de comportements d'apprentissage positifs en classe (Ladd et al., 2000; McLoyd, 1998; Pianta, 1997).

2. Rôle et implication du contrôle cognitif dans la période préscolaire

Le contrôle cognitif est constamment sollicité lors de l'enfance comme tout au long de la vie dès lors qu'une situation non familière, un problème ou qu'un conflit s'impose à nous. Dans cette partie nous nous intéresserons aux enjeux liés au bon développement du contrôle cognitif au cours de la période préscolaire. Au sein de quelles sphères de la vie quotidienne est-il le plus crucial et quelles sont les incidences du niveau de contrôle cognitif au cours de la petite enfance et même après ?

a) Contrôle cognitif & apprentissages

Au niveau préscolaire, c'est-à-dire avant l'entrée à l'école élémentaire et l'insertion dans les apprentissages formels, l'efficacité du contrôle cognitif explique déjà les performances obtenues sur des tâches sollicitant des compétences nécessaires à la mise en place des apprentissages académiques. On constate une association positive entre l'efficacité du contrôle cognitif et certaines compétences pré-académiques : connaissances en mathématiques (Blair & Razza, 2007; Brock et al., 2009; Bull et al., 2008, 2011; Bull & Scerif, 2001; Gerst et al., 2015; Sebastien Monette et al., 2011), connaissance des lettres (Cantin et al., 2016; Colé et al., 2014; De Franchis et al., 2017; Sebastien Monette et al., 2011) et conscience phonémique (Blair & Razza, 2007; De Franchis et al., 2017).

Au-delà de la période préscolaire, les liens entre réussite académique et FEs se maintiennent puisque le contrôle cognitif est un prédicteur stable des performances académiques mesurées dans l'enfance à l'âge scolaire, et même à l'âge adulte (Best et al., 2011; Cragg et al., 2017). Lorsque les capacités de

contrôle cognitif sont contrôlées au cours des analyses, l'association positive entre la mesure du quotient intellectuel et celles des performances scolaires est réduite voir supprimée (Blair & Razza, 2007). Ce qui fait du contrôle cognitif un meilleur prédicteur de la réussite scolaire que le quotient intellectuel (Bull et al., 2008; De Franchis et al., 2017).

Au travers de ces constats deux aspects sont à considérer, i) un contrôle cognitif bien développé lors de la période préscolaire permet de disposer des compétences nécessaires à la mise en place des connaissances académiques ii) un contrôle cognitif bien développé à l'âge scolaire permet de bien s'adapter lors de situations nouvelles comme les apprentissages formels. Le contrôle cognitif intervient ainsi comme un prédicteur important avec un rôle de médiation et de modération de la réussite scolaire.

b) Contrôle cognitif & relations interpersonnelles

Le développement des compétences sociales est crucial dans la petite enfance. Il permet l'émergence de comportements pro sociaux et l'engagement dans des interactions positives avec ses pairs (i.e. partage, coopération, aide) (Scourfield et al., 2004). Parmi les compétences engagées dans les relations interpersonnelles qui émergent lors de la période préscolaire on peut citer la théorie de l'esprit. Cette dernière, notamment évaluée au travers de tâches de fausses croyances, correspond à la capacité à envisager qu'un tiers dispose de ses propres connaissances, opinions et représentations et comprendre l'impact que peuvent avoir les états mentaux d'une autre personne sur son comportement (Wellman, 1992). Cette capacité est considérée comme un aspect central du développement de la maîtrise de soi (Bachevalier & Loveland, 2006) et est également positivement associée aux compétences de résolution de problèmes interpersonnels, aux compétences sociales positives et au jeu social entre pairs (Capage & Watson, 2001; Jenkins & Astington, 2000; Lalonde & Chandler, 1995; Watson et al., 1999).

La réussite dans l'exécution de tâches évaluant la théorie de l'esprit, telles que la tromperie intentionnelle, ou des tâches de fausses croyances est notamment expliquée par le niveau d'efficacité du contrôle cognitif (principalement les composantes d'inhibition et de mémoire de travail) (Carlson & Moses, 2001;

Davis-unger & Carlson, 2008; Sabbagh et al., 2006). Ces résultats démontrent l'implication des compétences mobilisées par le contrôle cognitif dans la théorie de l'esprit, font aussi du contrôle cognitif un médiateur des relations interpersonnelles (Watson et al., 1999).

c) Contrôle cognitif & autorégulation

L'autorégulation fait référence à la capacité de focaliser l'attention, de gérer les émotions et de contrôler les comportements (Blair & Razza, 2007; McClelland & Cameron, 2012). Elle recouvre des compétences incluant la capacité de déplacer et de focaliser l'attention, d'activer et d'inhiber le comportement si nécessaire et de moduler la réactivité comportementale et émotionnelle dans les interactions sociales (Halle & Darling-Churchill, 2016). Elle repose à la fois sur des processus physiologiques, attentionnels, émotionnels, cognitifs, comportementaux, interpersonnels et sociaux (Calkins & Fox, 2002). L'étude de l'autorégulation s'inscrit à l'interface de deux champs de recherche : les neurosciences et la psychologie et de deux approches : celles des fonctions exécutives et du contrôle volontaire. Une articulation de domaines qui nuit à l'obtention d'un consensus quant à la définition et à l'évaluation de l'autorégulation (Bailey, Duncan, Odgers, & Yu, 2015; Bailey & Jones, 2013; Burman, Green, & Shanker, 2015; McClelland & Cameron, 2012; Roebbers, 2017).

Cependant bien qu'un lien théorique entre autorégulation et contrôle cognitif paraisse évident (Bailey & Jones, 2019; Marie, 2009; Zhou, Chen, & Main, 2012), et malgré la mise en évidence de compétences partagées par le contrôle cognitif et l'autorégulation (Hongwanishkul et al., 2010), les études peinent à mettre en évidence cette relation de manière précise. Un travail initié par Zhou et collaborateurs (Zhou et al., 2012) et poursuivi par Bailey et collaborateurs a permis de créer un modèle intégratif de l'autorégulation à partir des différentes approches précédemment mentionnées. Ce modèle présenté dans la figure 5, illustre la manière dont se développeraient les compétences nécessaires à la mise en œuvre de l'autorégulation. Au fur et à mesure du développement et avec l'expérience, des compétences de régulation, premièrement génériques, s'affineraient pour se distinguer en composantes gérées par un système de supervision. Les auteurs précisent que la régulation peut être mise en œuvre

au sein de différents domaines de régulation (cognitive, émotionnelle et sociale), chacun laissant place au développement de connaissances, de compétences et d'expériences relative(s) au domaine. Enfin, selon les auteurs, les processus de régulations matures donnent lieu à la "Gestalt régulatrice" c'est-à-dire à la conjugaison des différentes connaissances, compétences et expériences propres à chacun des domaines dans une dynamique de généralisation des processus de régulation reposant sur un socle commun : le contrôle cognitif.

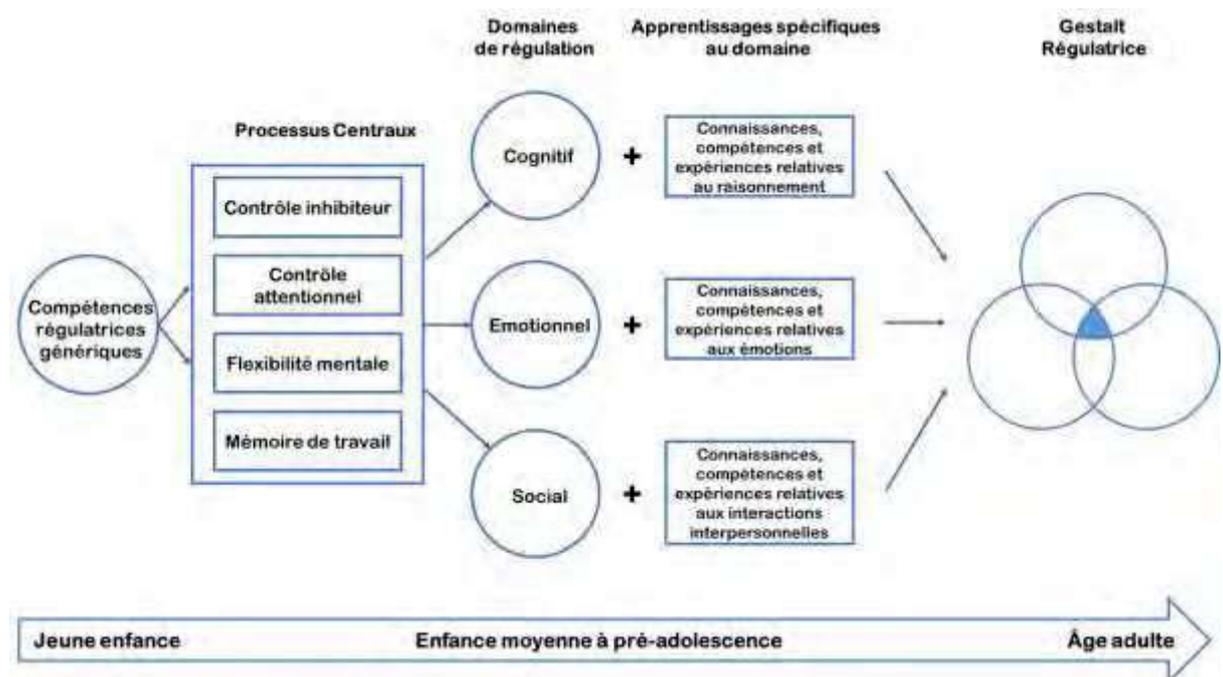


Figure 5. Modèle de développement de l'autorégulation. (D'après Bailey et al., 2019)

Un exemple d'autorégulation au cours de l'enfance est la mise en œuvre d'un comportement pro-scolaire (traduction de « *learning related behavior* » en anglais). Le comportement pro-scolaire et l'engagement scolaire des enfants sont positivement associés au contrôle cognitif (Brock et al., 2009; Jacobson et al., 2011). Le comportement pro-scolaire repose sur les trois domaines de régulation et permet de mettre en place un comportement adapté au contexte de l'école. C'est un préalable indispensable à l'apprentissage (Blair, 2002; Raver & Knitze, 2002). On le définit au travers 4 aspects : i) les compétences sociales, ii) l'ajustement, iii) les habitudes de travail et iv) l'autocontrôle (Brock

et al., 2009). L'école est un environnement complexe impliquant d'adopter son comportement en fonction du contexte social (i.e. écoute, partage), émotionnel (i.e. gestion de la frustration, maîtrise de soi, résolution de conflit), mais aussi du contexte d'apprentissage (i.e. attention, inhibition de comportement inappropriés, respect des consignes). Cet exemple illustre l'étendue de l'implication du contrôle dans la vie de l'enfant et notamment son impact sur la réussite académique. Il souligne également l'importance de l'intégration des compétences de contrôle au travers des domaines de régulation pour mettre en place des comportements adaptés dans des environnements complexes.

3. Corrélats neuronaux et cérébraux du développement exécutif

Le cortex préfrontal (CPF) est impliqué dans le traitement exécutif (E. K. Miller & Cohen, 2001; D T Stuss & Knight, 2013). La maturation cérébrale du CPF connaît un rythme particulier, s'étendant de la période utérine jusqu'au début de l'âge adulte (E R Sowell et al., 1999). Au cours de cette période, le cortex frontal va grossir jusqu'à représenter la moitié du volume cérébral et créer des connexions avec l'ensemble du cortex (Stuss, 2011). La croissance se caractérise par une augmentation du volume de matière blanche consécutive au phénomène de myélinisation permettant une meilleure conduction du signal électrique et donc une meilleure efficacité de la communication neuronale (Casey, Tottenham, Liston, & Durston, 2005; Sowell et al., 2003). Des gaines de myéline apparaissent permettant d'isoler les axones et d'améliorer leur conductivité. Conjointement, une réduction du volume de la matière grise liée au phénomène d'élagage neuronal (« *pruning* » en anglais) reflète la destruction des connexions neuronales superflues ou inutiles (Leisman, Mualem, & Mughrabi, 2015; pour revue : Brown & Jernigan, 2012; Casey, Giedd, & Thomas, 2000). Les connexions existantes et mobilisées se renforcent au travers d'un processus de potentialisation à long terme répondant à un mécanisme connu comme la règle de Hebb : si deux neurones émettent des influx nerveux simultanément (ou presque), la synapse qui les relie se renforce.

« neurons wire together if they fire together »(Löwel & Singer, 1992)

Ce processus de maturation est marqué par deux notions clés : plasticité et vulnérabilité (Andersen, 2003). La plasticité correspond à la capacité du

cerveau à reconfigurer son organisation, ses réseaux. Pour cela il est capable tout au long de la vie de créer de nouvelles connexions, ainsi que d'en faire disparaître (T. T. Brown & Jernigan, 2012). La notion de vulnérabilité quant à elle, fait référence au fait que le développement et les réaménagements neuronaux sont fortement influencés par l'expérience et l'environnement. Aussi, par nature, le cerveau des enfants d'âge préscolaire est doté du potentiel de pouvoir se développer et d'atteindre une maturité sous-tendant des capacités efficaces. Cependant l'impact du milieu est crucial dans le bon déroulement de ce processus (Kolb & Gibb, 2011).

a) Aires corticales impliquées dans le contrôle cognitif

Le développement du contrôle cognitif est largement étudié au travers de tâches de conflits telles que les tâches de Flanker, Stroop et Go / NoGo (Casey et al., 2000; Crone, Donohue, et al., 2006; Tamm et al., 2002). Ces études révèlent que les enfants recrutent les régions préfrontales plus fortement et de façon plus diffuse que les adultes pour effectuer ces tâches de contrôle cognitif. Le contrôle cognitif est sous-tendu par l'activité de plusieurs aires cérébrales dont majoritairement le cortex préfrontal (CPF), et le cortex cingulaire antérieur (CCA) (Botvinick et al., 2001; Carter & van Veen, 2007; Kerns et al., 2004).

Le CPF se subdivise en plusieurs aires ; i) le cortex dorsolatéral, lui-même scindable en sous-zones cérébrales (le cortex dorsolatéral : aires 8, 9, 48 et le cortex dorsolatéral ventrolatéral : aires 44, 45, 47), ii) le cortex orbitofrontal (aires 47 et 11), iii) le cortex fronto-polaire (aire 10) (voir figure 6 pour visualiser la neuroanatomie).

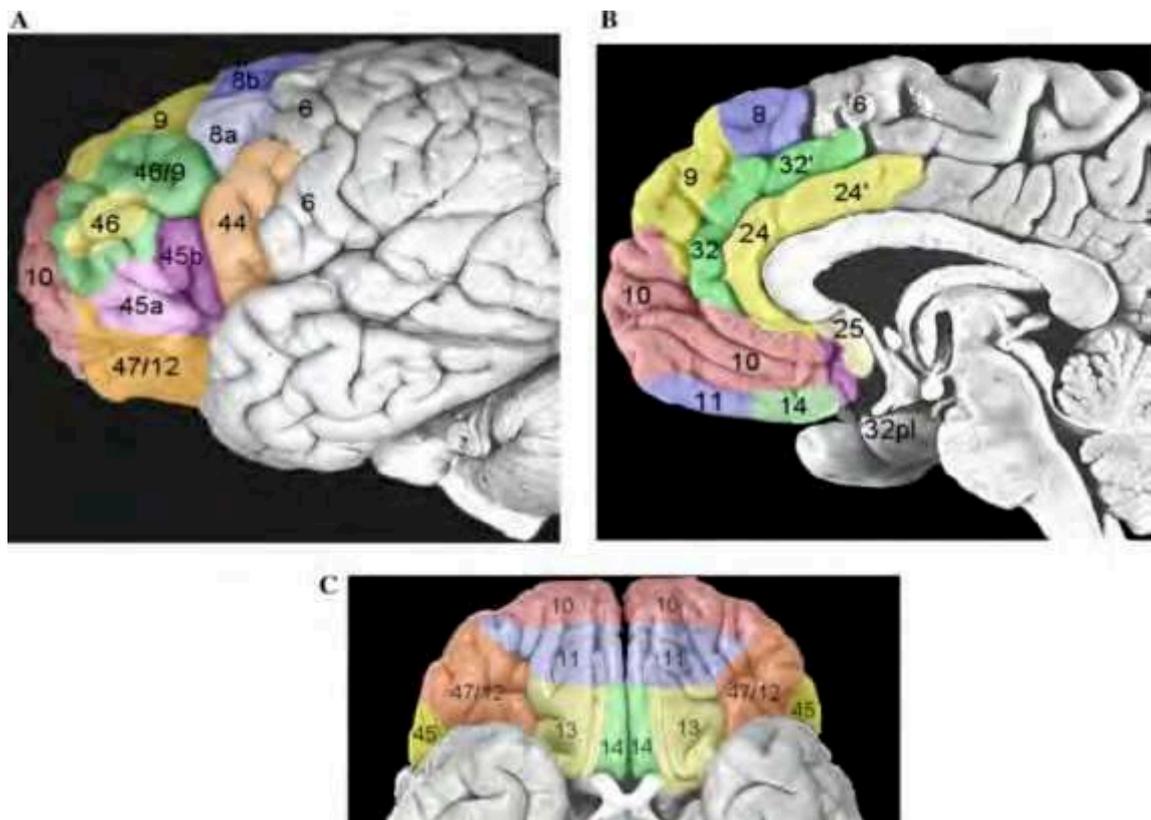


Figure 6. Cartes cytoarchitectoniques du cortex préfrontal indiquant les aires de Brodmann de la surface latérale du PFC (A), sur la paroi médiale en vue midsagittale (B) et sur la surface orbitale ventrale vue de dessous (C). (Ridderinkhof et al., 2004)

Le CPF est la partie du cerveau subissant la période de maturation la plus importante. Elle est majoritairement associée au langage et aux aptitudes permettant le raisonnement (Brown & Jernigan, 2012; Ridderinkhof et al., 2004).

Le CCA est situé le long de la scissure inter hémisphérique, autour de la partie antérieure du corps calleux (aires 24 et 32). Cette zone particulière est mobilisée lors de l'implémentation de l'ensemble des sous composantes du contrôle cognitif. Ce "nœud exécutif", situé dans la région fronto-centrale, est très largement étudié dans les études d'imagerie ou d'électrophysiologie adulte (Cavanagh & Shackman, 2015; Cohen, 2014) comme chez l'enfant (Liu, Woltering, & Lewis, 2014). L'activité neuronale enregistrée dans cette zone (faisant référence aux sites d'enregistrement situé aux environs de FCz dans le système International 10/10) est reportée dans de nombreuses études chez l'enfant (à partir de 3 ans) ou l'adulte, comme reflétant l'activation sous-jacente du CCA (Espinete, Anderson, & Zelazo, 2012; Jonkman, Sniedt, & Kemner,

2007; Liu, 2019). Cela a été mis en évidence au moyen de techniques variées : imagerie, localisation de source en EEG, NIRS.

Le CCA a un rôle dans la surveillance des conflits (i.e. lors d'une interférence stimulus-réponse) pouvant, le cas échéant, mobiliser davantage de contrôle cognitif impliquant des ajustements comportementaux associés à une augmentation de l'activité du CPF (Kerns et al., 2004). L'activation du CCA est inversement corrélée à l'âge, les enfants les plus jeunes auront une activation plus forte du CCA reflétant un contrôle cognitif moins mature et une implémentation accrue de ce dernier pour réguler leur comportement (Braet et al., 2009; Casey et al., 1996). Cela suggère que l'activation accrue du CCA repose sur un réseau encore immature, des connexions longues distances non développées et un traitement requérant plus de contrôle donc plus d'effort pour répondre correctement. Burgess & Braver avancent que c'est le cortex prémoteur antérieur (CPMA) permet de prédire la demande cognitive attendue et si besoin d'enregistrer une demande accrue de contrôle cognitif (Burgess & Braver, 2010). En fonction des études les aires de CCA ou CPMA, toutes deux situées en région fronto-centrale, se confondent où se complète dans ce rôle.

Au moyen d'analyses fonctionnelles en IRMf, Cole et Schneider (2007), étudient d'ailleurs ces deux aires comme incorporées au sein d'une composante unifiée du réseau du contrôle cognitif (Cole & Schneider, 2007). Selon ces mêmes auteurs l'activité CCA/CPMA serait impliquée dans des processus de préparation de l'action lorsque le besoin anticipé de contrôle cognitif est le plus élevé. Le nœud CCA / CPMA surveille la présence d'un conflit et le cas échéant signale au DLPFC de stimuler l'activité de l'ensemble des réseaux impliqué dans le traitement exécutif. L'activité du DLPFC est liée au maintien actif d'information liée au but (Brown & Braver, 2005; Cole & Schneider, 2007). L'activité constaté lors de tâches de contrôle cognitif dans le nœud CCA/CPMA est fortement corrélé à celle observée dans le nœud situé dans le DLPFC (Duncan & Owen, 2000). Cela explique pourquoi la région fronto-centrale est aussi étudiée dans les tâches de conflit, notamment celles impliquant de manière importante le contrôle cognitif (i.e. MDT, tâche de reconfiguration).

L'augmentation d'efficacité avec l'âge du contrôle cognitif dépend également de la mise en place progressive de réseaux plus vastes. Ces réseaux établissent des connexions à longue distance assurant un traitement et un recrutement plus efficace des zones impliquées dans les processus de régulation observés dans la gestion de conflit chez l'adulte (Mizuhara et al., 2004). Par exemple dans une étude évaluant le recrutement neuronal dans une tâche de contrôle cognitif (tâche d'Eriksen), des différences d'activations relatives à des aires postérieures (pariétales) ont été relevées (Bunge et al., 2002). L'efficacité du contrôle cognitif d'enfants de 8 à 12 ans repose sur l'activation accrue de zones pariétales. Les enfants les plus performant montrent des patterns d'activations proches de ceux observés chez l'adulte, alors que chez les enfants moins performants l'activation de ces zones est moindre (Bunge et al., 2002).

Pour résumer, la détection de conflit s'exécute au niveau du CCA qui déclenche des ajustements stratégiques dans le DLPFC afin de mettre en place la régulation, c'est-à-dire, d'atténuer les conflits et d'améliorer les performances ultérieures (Kerns, 2006). Le DLPFC peut alors moduler l'attention en fonction des exigences de la tâche, maintenir les règles d'action et sélectionner les réponses appropriées (Niendam et al., 2012). Les aires pariétales, quant à elles, fournissent au DLPFC des informations sur la saillance du stimulus et les associations Stimulus-Réponse connues.

b) L'EEG : outil d'investigation du développement du contrôle cognitif chez l'enfant

L'électroencéphalogramme (EEG) enregistré sur le cuir chevelu reflète l'activité électrique consécutive à la somme des potentiels postsynaptiques synchrones ou émis à un moment très proche provenant de nombreuses cellules pyramidales (Stern et al., 2001). Au niveau de leurs synapses, elles émettent des signaux inhibiteurs ou excitateurs qui assurent la transmission d'un signal électrique qui se déplace le long d'un axone plus ou moins long reliant les différentes zones du cerveau. Cet influx nerveux se traduit par des déplacements ioniques diffus qui sont alors captés par l'EEG au travers des tissus et de l'os.

L'approche par EEG présente l'intérêt majeur de fournir des informations précises quant à l'activité neuro-oscillatoire du cerveau (Uhlhaas et al., 2010) pouvant refléter à la fois la maturité et l'efficacité des réseaux corticaux (König, Engel, Roelfsema, & Singer, 1995 pour la synchronisation des activités oscillatoires par exemple). L'utilisation de ce dispositif mobile, non invasif et bien accepté par les enfants permet de recueillir une mesure de façon plus écologique que d'autres techniques d'imagerie ou d'électrophysiologie (IRMf, MEG, TEP). Cependant, le signal EEG peut être contaminé par des signaux parasites (biologiques, environnementaux, cognitifs). Afin de limiter l'impact de ces contraintes et d'augmenter le rapport signal sur bruit il est nécessaire de faire un nombre important de répétition de la tâche (essais). On cherche alors à déterminer la réponse neuronale qui est évoquée de manière systématique et qui peut être modulée au travers des différentes conditions expérimentales. Cependant avec les enfants l'augmentation du nombre de répétition est limitée. Les capacités réduites d'attention et la fatigabilité accrue de ces sujets contraignent le nombre d'essai et le temps passé assis devant l'ordinateur et on estime à 20% le taux d'essais contaminés par ces artéfacts de mouvement chez les enfants (Bell & Cuevas, 2012).

Les travaux de Bell et collaborateurs rapportent comment évoluent l'activité EEG au travers de différentes sous-périodes de la période préscolaire: les bébés (5-10 mois), les très jeunes enfants (2 ans) et les jeunes enfants (3-4 ans) permettant ainsi d'appréhender les prémices du développement cognitif jusqu'à notre période d'intérêt (Cuevas, Bell, Marcovitch, & Calkins, 2012; Cuevas, Hubble, & Bell, 2012; Cuevas, Swingler, Bell, Marcovitch, & Calkins, 2012; Diaz & Bell, 2011; Morasch & Bell, 2011; Smith & Bell, 2010). Chez le bébé, ils ont montré que l'amplitude frontale et occipitale ainsi que la cohérence EEG (synchronie neuronale) des zones fronto-pariétales en période de non-activité permettent de prédire la performance à la tâche A-non-B entre 7 et 12 mois (Bell & Fox, 1997). La tâche A-non-B est largement utilisée pour étudier les processus cognitifs impliqués dans l'inhibition et la MDT chez le bébé en EEG. Les bébés âgés de 8 mois ont une amplitude accrue de l'activité EEG en basse fréquence lors des essais correctes que lors des essais incorrectes lors de la réalisation de la tâche A-non-B (Bell, 2002; Cuevas, Raj, et al., 2012). A

partir de 10 mois l'activité neuro-oscillatoire frontale enregistrée lors de la réalisation de la tâche A-non-B devient plus localisée dans la zone frontale médiale postérieure (Cuevas, Bell, et al., 2012). Une distinction entre les enfants réussissant mieux la tâche versus réussissant moins bien la tâche montre que la réussite est associée à une augmentation de la cohérence EEG (fronto-médial - pariétale) lors de la tâche et à une augmentation de l'amplitude (en fronto-polaire, fronto-médial, pariétal et occipital) (Bell & Wolfe, 2007; Wolfe & Bell, 2004).

Pour les très jeunes enfants, une association positive entre l'amplitude EEG frontale et des scores d'inhibition (reportés par les parents) est observée (Morasch & Bell, 2011).

Pour les jeunes enfants à partir de 3 ans, la tâche proposée est principalement la tâche Day & Night (Stroop adapté aux enfants). Les performances lors de la réalisation de cette tâche sont expliquées par le changement de l'amplitude EEG lors de la tâche versus en condition de repos (Bell & Wolfe, 2007; Wolfe & Bell, 2004). Ces mêmes auteurs montrent une augmentation de l'amplitude en zone fronto-médiane et de la cohérence fronto-médiale - postérieure lors de la réalisation de la tâche. Entre la première année de vie et l'âge de 4 ans, on observe une augmentation étendue de l'amplitude EEG lors de la réalisation de la tâche et une réduction de la cohérence générale, reflet de l'organisation des réseaux cérébraux sous-jacents. Cette maturation permet une activité neuronale de plus en plus localisée aux aires frontales au cours de l'enfance ainsi qu'une synchronie neuronale plus spécifique aux aires concernées par les traitements exécutifs impliqué dans la réalisation de la tâche.

c) Potentiels évoqués comme marqueurs du contrôle cognitif

Les potentiels évoqués correspondent à la sommation des potentiels postsynaptiques liés à un événement. Il s'agit d'une activité électrique caractérisée par une latence (en ms) et une amplitude (en μV).

La composante N2 (ou N200) a été étudiée au travers de nombreuses tâches de conflit chez l'enfant ou l'adulte (Stroop, Flankers, Eriksen, Simon). Son

amplitude plus marquée lors d'essai incompatibles, reflète l'intensité du conflit et témoigne des ressources mobilisées en terme de contrôle cognitif afin de satisfaire à la tâche (Bruchmann et al., 2010; B Kopp et al., 1996). Cependant, l'approche développementale met en avant le fait que, chez l'enfant, cette signature bien présente, dispose d'une localisation et d'une temporalité différente (plus frontale et plus tardive que chez le sujet plus mature). La figure 7 montre l'évolution des ERPs (topographie et latence) associées à différents processus intervenant dans une tâche de conflit (Rueda, Posner, et al., 2004).

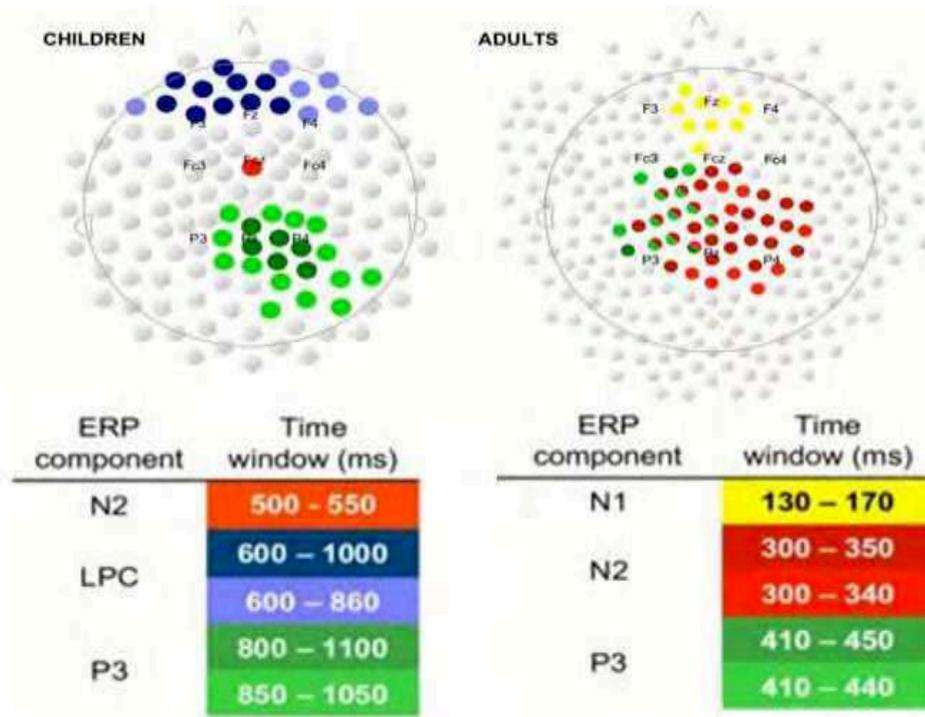


Figure 7. Distribution topographique des potentiels d'action évoquées N2 et P3 (ainsi que N1 et LPC non discutés ici) chez les enfants (128 électrodes) et les adultes (256 électrodes). Les électrodes marquées présentaient des différences significatives ($p < 0,05$) congruentes par rapport aux différences non congruentes. Les tableaux indiquent les fenêtres temporelles dans lesquelles surviennent chacun de ces potentiels évoqués. L'activité est enregistrée lors de la réalisation d'une tâche d'ANT (Attention Network task) reconnue comme étant une tâche d'attention exécutive. Elle implique l'inhibition de stimulus distractifs incompatible avec le stimulus cible. (Rueda et al., 2004)

Ces marqueurs sont également sensibles à la stratégie de mise en place du conflit (Bruno Kopp et al., 2014). En effet, la composante P3 (ou P300) a été associée à l'implémentation du contrôle cognitif lors d'une tâche d'alternance. La comparaison des performances et des potentiels évoqués d'adultes de deux

groupes d'âges : jeunes (18-39 ans) et âgés (64-83 ans) a montré que malgré l'absence de différence en termes de performance entre les deux groupes, des différences étaient observables à la fois dans les deux modes de contrôle mis en œuvre et dans l'activité neuronale sous-jacente. L'analyse de la P3 a permis de révéler que les sujets plus jeunes engageaient leur contrôle cognitif de manière plus proactive que les sujets plus âgés. Chez ces derniers, la prévalence d'un mode de contrôle réactif était associée à une réduction de l'activité frontale. Pour les plus jeunes, cette activation frontale accrue a été associée à un mécanisme préparatoire. Par ailleurs, cette étude révèle également que chez les sujets âgés l'amplitude de la composante P3 était positivement corrélée à la performance (moins de persévérations) alors que chez les sujets plus jeunes une amplitude de P3 élevée était associée à une performance plus faible (temps de réponse plus longs). Chez des enfants de 4 ans l'amplitude et la latence de P3 sont plus élevées que chez les adultes, suggérant que les jeunes enfants mettent plus de temps que les adultes à évaluer la tâche. Par ailleurs l'amplitude est plus importante pour les essais incompatibles révélant que plus l'effort pour sélectionner la réponse correcte est élevé, plus l'amplitude de P3 pour les essais incompatibles est grande, faisant de P3 un marqueur de l'intensité du conflit.

Ces deux composantes N2 et P3 sont les principales reportées dans la littérature sur le contrôle cognitif. Elles partagent comme particularité commune leur distribution topographique puisqu'elles sont toutes les deux localisées en zone fronto-centrale lorsque les réseaux impliqués dans le contrôle sont matures. La zone fronto-centrale s'apparente à un site de supervision de l'action et de détection des interférences. Lorsque l'interférence génère un conflit, cette zone qui est étroitement connectée aux autres aires impliquées dans les fonctions du contrôle (dont le CPF) va alors jouer un rôle de coordination (Pour une revue sur les marqueurs électrophysiologiques lors de tâches d'inhibition voir Huster, Enriquez-Geppert, Lavalée, Falkenstein, & Herrmann, 2013).

d) Rôle des oscillations thêta

Les oscillations neuronales, ou ondes cérébrales, sont des courants électriques rythmiques issus de l'activité neuronale. Au travers de l'EEG on enregistre l'activité oscillatoire d'un ensemble de neurones qui vont interagir et se synchroniser. C'est un signal tridimensionnel caractérisé par son amplitude (en μV), sa fréquence (en Hz) et sa phase (en $^\circ$). On étudie l'activité oscillatoire en fonction de sa fréquence au moyen de bandes de fréquences (i.e. delta [1-4 Hz], thêta [4-8 Hz], alpha [8-13 Hz], beta [13-35 Hz], gamma [>35 Hz]).

Dans cette étude nous nous intéresserons aux oscillations dans la bande de fréquence thêta⁵ qui sont générés par les neurones cingulaires (Tsujimoto et al., 2006; Wang, 2005; Womelsdorf et al., 2010) et qui montrent une activité renforcée et soutenue après un conflit (Sheth et al., 2012). L'oscillation thêta en zone fronto-centrale (ci-après dénommée MFT pour "Mid-frontal Thêta") est modulée par les punitions, les erreurs (Shackman et al., 2011; Shenhav et al., 2013) et les ajustements comportementaux (Miltner et al., 1997). La MFT est donc interprétée comme le substrat électrophysiologique reflétant la mise en œuvre des processus du contrôle cognitif, notamment l'activité du système de surveillance de conflit (Cavanagh et al., 2011; Cohen, 2014; Nigbur, Ivanova, & Stürmer, 2011; Sauseng, Griesmayr, Freunberger, & Klimesch, 2010). L'amplitude de la MFT augmente de façon linéaire lorsqu'augmente la complexité de l'interférence (Hanslmayr et al., 2008) et prédit les TR pour des tâches de conflit de réponse (Cohen & Cavanagh, 2011; Cohen & Donner, 2013; Gulbinaite, van Rijn, & Cohen, 2014).

Chez l'enfant, peu d'étude se sont intéressées aux fluctuations de la MFT au cours de la réalisation d'une tâche de conflit. Liu et collaborateurs ont réalisé une étude impliquant des sujets de 8 à 18 ans réalisant une tâche de Go/No-Go (Liu et al., 2014). Les auteurs ont utilisés une méthode de localisation de source pour montrer que la MFT [3.9-7.8Hz] enregistrée lors des traitements de

⁵ L'oscillation thêta est associée à un rythme compris entre [4-8Hz] chez l'adulte (Cohen et al., 2013; Sauseng et al., 2007) et entre [3-7Hz] (Saby et al., 2012) chez le jeune enfant parfois [3.6-6Hz] (Orehova et al., 1999)

contrôle de réponse était bien issue de l'activité du CCA. Leurs résultats montrent que chez les sujets plus matures, les traitements cérébraux impliquant le CCA sont plus stables au travers des essais. Cela s'accompagne également de performances comportementales plus stables. De plus l'amplitude de la MFT liée au conflit réduit avec l'âge. Les auteurs ont différencié deux conditions de conflit cognitif : "effort faible" et "effort élevé" définis d'après le coût en attention soutenu de la tâche. Les deux premiers blocs étaient associés à un effort faible et le bloc final à un effort élevé révélant un effet d'interaction entre l'âge et l'effort en contrôle cognitif. Les enfants les plus jeunes ne manifestent pas de différence en termes d'amplitude de MFT en fonction de la condition de l'effort, alors que les sujets les plus âgés engagent significativement plus de contrôle cognitif (reflété à travers une plus grande amplitude de MFT) lors des essais jugés plus complexes. Malgré la diminution développementale de l'amplitude de MFT, lors de l'implémentation du contrôle les enfants les plus matures montrent une augmentation plus forte de l'amplitude de MFT par rapport à une condition de repos et par rapport à des sujets moins matures. L'amplitude de MFT est donc un marqueur de l'implémentation du contrôle cognitif pouvant à la fois caractériser des effets développementaux et des effets d'intensité de mobilisation des processus de contrôle dans une tâche de conflit chez des enfants.

POINTS CLÉS

- ☞ Le développement du contrôle cognitif est soumis à un développement précoce, non linéaire et étalé dans le temps
- ☞ Les habiletés labélisées comme fonctions exécutives émergent progressivement et de manière asynchrone au cours du développement, ne permettant l'identification d'un modèle tripartite mature du contrôle cognitif qu'au début de l'adolescence.
- ☞ Au cours de l'enfance les performances du contrôle cognitif vont s'améliorer aboutissant à une meilleure adaptation comportementale et notamment à de meilleures capacités de gestion de conflit cognitif
- ☞ Le développement du contrôle cognitif est influencé par l'environnement. Plus l'environnement se montre capable de stimuler l'enfant et de limiter les facteurs stressants, plus le contrôle cognitif a le potentiel de se développer.
- ☞ Le contrôle cognitif au cours de l'enfance intervient comme un médiateur et modérateur de la réussite scolaire. Il permet de soutenir les apprentissages formels ainsi que l'ajustement du comportement au contexte scolaire
- ☞ Le cortex préfrontal et le cortex cingulaire antérieur interviennent dans la détection du conflit, dans la surveillance du niveau de contrôle cognitif nécessaire à la réalisation de la tâche en cours et dans la mobilisation des processus exécutif permettant de fournir une réponse
- ☞ Au travers de différents aspects de l'activité électrique sous-jacente au traitement du contrôle cognitif (amplitude, de l'oscillation, latence des potentiels évoqués, cohérence fonctionnelle entre différentes aires cérébrales) l'EEG permet d'appréhender la dynamique développementale, ainsi que l'efficacité des processus de traitement du contrôle cognitif

C. ENTRAÎNEMENT DU CONTRÔLE COGNITIF

Dans cette partie, nous commencerons par définir l'entraînement du contrôle cognitif, présenter ses enjeux, notamment éducatifs, et ses mécanismes. Nous aborderons aussi les différents types d'entraînements adaptés à l'enfant et leurs bénéfices respectifs. Nous présenterons et justifierons enfin l'approche dans laquelle s'insère ce travail de thèse et les questions auxquelles le présent travail a tenté de répondre : les mécanismes de l'entraînement, ses enjeux et la méthode avec laquelle ils sont généralement évalués dans le milieu académique. Puis, nous présenterons des données empiriques issues d'entraînements du contrôle cognitif auprès de jeunes enfants. Enfin, nous resserrons l'angle d'observation pour décrire l'approche écologique tournée vers l'utilisation du jeu de faire semblant comme activité support à l'entraînement.

1. Définition

L'entraînement du contrôle cognitif correspond à la sollicitation (ou stimulation) du contrôle cognitif ou d'une de ses composante de façon répétée au cours d'une période de temps au moyen d'une ou plusieurs activité(s) (Rabipour & Raz, 2012). L'entraînement peut répondre à différents objectifs : améliorer, développer ou restaurer un fonctionnement ou une compétence. Les termes d'intervention ou de programme peuvent aussi être assimilés à celui d'entraînement (Blair & Raver, 2014; N. M. Dias & Seabra, 2016; Pietto et al., 2018; Schmitt et al., 2015).

2. Intérêts

Un retard dans l'acquisition des fondements développementaux du contrôle cognitif est susceptible à la fois d'altérer le développement des capacités émergentes, mais aussi, de générer d'autres retards de développement sur des capacités neurocognitives à émerger (Anderson et al., 2013; Karmiloff-Smith, 2009). Il est donc crucial d'agir le plus rapidement possible au cours du développement. Les avancées combinées de la neuro-imagerie et de la modélisation montrent qu'il est possible d'influer sur le processus de maturation neuronale (Durstun & Casey, 2006; Fair et al., 2008; Fair et al., 2007). La

période préscolaire, marquée par une forte plasticité cérébrale, est une fenêtre temporelle particulièrement stratégique pour la mise en place d'interventions éducatives ciblant le contrôle cognitif (Adele Diamond & Ling, 2016). L'intérêt de la mise en place de telles procédures est majeur pour les publics aux trajectoires développementales altérées. En effet, les enfants ayant des compétences de contrôle cognitif plus faibles (i.e. enfants issus de milieux défavorisés) sont plus sensibles aux effets bénéfiques d'entraînements sur leur niveau du contrôle cognitif ou d'autorégulation en comparaison à leurs pairs plus favorisés (McDermott, Westerlund, Zeanah, Nelson, & Fox, 2012; McDermott et al., 2018). Une intervention ciblée sur le contrôle cognitif, ou plus largement sur l'autorégulation, permet de combler un déficit précoce lié à des problématiques de pauvreté ou d'adversité (Neville et al., 2013; Pietto et al., 2018; Traverso, Viterbori, & Usai, 2015 ; pour revue voir Burger, 2010). L'enjeu principal est d'ordre sociétal. Il s'agit, à court ou moyen terme, de pouvoir augmenter les chances de réussite scolaire (Bull & Scerif, 2001; Nayfeld et al., 2013). A plus long terme, l'entraînement du contrôle cognitif, au cours de la période préscolaire, peut aussi affecter d'autres aspects de la vie tels que : la réussite académique au-delà de l'enfance, la réussite professionnelle ou encore la santé (Moffitt et al., 2011). Appréhendée avec une perspective économique, la mise en place d'entraînement s'avère également un moyen rentable de minimiser les coûts associés à l'échec scolaire (Temple & Reynolds, 2007). Des études de coûts-bénéfices ont estimé que des interventions bien conçues pour la petite enfance génèrent un retour sur la société allant de 2\$ à 16\$ pour chaque dollar consacré au programme (Karoly, L.A., Kilburn, R., Cannon, 2005; L. a. Karoly, 2012; Temple & Reynolds, 2007).

3. Bénéfices

Le bénéfice direct d'un entraînement est une meilleure efficacité sur l'activité entraînée. Cependant, d'autres bénéfices peuvent être constatés comme l'apparition ou le développement de nouvelles compétences. On parle alors de transfert. Le terme de transfert (comprendre transfert de bénéfice) représente le bénéfice, consécutif à un entraînement, généralisé sur une tâche et/ou dans un contexte non-entraîné. En fonction de la proximité de la tâche par rapport à la tâche entraînée et de la similarité des processus impliqués dans sa

réalisation on parlera de transfert proche ou éloigné. Par exemple, un entraînement reposant sur une activité de MDT verbale peut entraîner un bénéfice direct qui est une amélioration de la performance sur cette même tâche. Un effet de transfert proche pourrait être l'amélioration de la performance à une tâche de calcul mental qui implique d'utiliser la boucle phonologique (MDT verbale) pour maintenir actives les étapes de calcul et réaliser l'opération mentalement. Un effet de transfert éloigné pourrait être une amélioration de l'attention soutenue. Le transfert proche est donc un bénéfice sur le processus lorsqu'il est impliqué dans un contexte différent de celui entraîné, alors que le transfert éloigné est un bénéfice plus global impliquant des processus moins spécifiques.

Plusieurs revues de la littérature dressent le bilan d'entraînements visant à améliorer le fonctionnement exécutif (Adele Diamond & Ling, 2016; Enriquez-Geppert et al., 2013; Karbach, 2015; Karbach & Unger, 2014; Klingberg, 2016; Rabipour & Raz, 2012; Wass, 2014) ou plus spécifiquement la MDT (Buschkuehl et al., 2012; Kuo et al., 2014). Au travers de leurs analyses et de leurs recommandations il est possible de pointer des aspects cruciaux de l'implémentation de ces entraînements afin de favoriser la génération de bénéfices.

4. Critères d'efficacité

Dans la littérature, les protocoles d'entraînement recensés proposent un vaste panel méthodologique pour ce qui est de leurs modalités d'intervention. Afin de les comparer nous allons distinguer deux aspects qui permettent de définir la méthode d'intervention : le dosage et le contenu.

a) Dosage : Durée, Intensité & Fréquence

La notion de dosage regroupe les spécificités du cadre au sein duquel est délivré l'entraînement. Ainsi, les critères auxquels nous allons nous intéresser sont la durée, l'intensité ainsi que la fréquence.

Les études montrent que plus la durée (période sur laquelle se déroule l'entraînement) est importante, plus l'intervention sera bénéfique au regard de la performance comportementale (Adele Diamond & Ling, 2016). Par exemple,

Jaeggi et collaborateurs constatent au moyen de 4 modalités de durée (8, 12, 17 et 19 semaines), que plus un entraînement de la MDT est long, plus il est associé à de meilleurs bénéfices pour la fonction entraînée (Jaeggi et al., 2008). De plus, la durée permet également de prédire l'importance des effets de transfert (Jaeggi et al., 2014). Ces données concernent cependant majoritairement des entraînements informatisés de la MDT.

L'intensité, correspond au nombre de sessions d'entraînement proposées.

Alloway et collaborateurs ont étudié ce paramètre en évaluant deux modalités d'intensité : un entraînement intense de la MDT de 24 sessions et un entraînement moins intense de 8 sessions (Alloway et al., 2013). Pour les deux groupes l'intégralité des sessions étaient dispensées sur une période de 8 semaines. Les auteurs ont constaté que pour des enfants avec difficultés d'apprentissage, l'entraînement intense pouvait générer des effets de transfert alors que l'entraînement moins intense ne le permettait pas (Alloway et al., 2013).

La combinaison des deux précédents critères permet d'appréhender un dernier paramètre : la fréquence, soit le nombre de session d'activité pour une durée définie. Penner et collaborateurs ont comparé un programme d'entraînement de la MDT en proposant deux modalités de fréquence. Ils concluent qu'un programme de 16 sessions réparties sur 8 semaines montrent de meilleures performances en MDT, en mémoire à court terme et en vitesse de traitement comparativement à un groupe ayant réalisé le programme avec le même nombre de séances sur 4 semaines (I.-K. Penner et al., 2012). Ce résultat pointe l'intérêt de solliciter les compétences de contrôle de manière intense et régulière sur le long terme.

b) Contenu : Complexité, Originalité & Diversité

Les paramètres de contenu ont notamment été étudiés dans les travaux d'évaluation du programme Cogmed. Ce dernier est un programme d'entraînement informatisé ciblant la mémoire de travail. Il se base sur de petits jeux inspirés de tâches cognitives (i.e. Trail making Test, Self ordered pointing task, Rappel de séquences) adaptés aux enfants à partir de 4 ans. Klingberg et collaborateurs (Klingberg et al., 2005) ont comparé l'efficacité du même programme, auprès d'enfants présentant un trouble TDAH, dans deux

modalités différentes une première en modalité de complexité progressive et une seconde de complexité fixe (i.e. un niveau de difficulté adaptatif à la performance de l'enfant versus un niveau simple fixe tout au long de l'entraînement). Ces résultats montrent qu'en adaptant la complexité de la tâche d'entraînement aux capacités croissantes de l'enfant au cours de la période d'entraînement on accroît les bénéfices de cet entraînement par rapport aux enfants chez qui l'entraînement était proposé en modalité complexité fixe. Les bénéfices sont rapportés au travers de mesures de MDT (verbale (Digit Span) et non-verbale (Word/digit recall)), inhibition (Stroop), raisonnement (matrices de Raven), réduction de l'inattention et de l'hyperactivité/impulsivité reporté au travers du Questionnaire de Conners. Ces effets ont été répliqués par Holmes et collaborateurs auprès d'enfants avec un niveau initial bas mémoire de travail (Holmes et al., 2009). Les résultats sont très similaires et révèlent davantage de bénéfices (uniquement sur des tâches de mémoire de travail) pour le groupe avec niveau de difficulté incrémentiel. De manière générale, et comme reporté par la revue de Diamond & Lee, la majorité des protocoles d'interventions prennent en compte ce paramètre (Diamond & Lee, 2011). Il apparaît donc nécessaire que la difficulté soit adaptée au participant pour lui proposer une tâche suffisamment complexe pour solliciter de sa part la mise en œuvre de processus contrôlés (et non pas un traitement automatique), sans pour autant être trop complexe et ainsi perdre toute cohérence avec le champ d'évolution de ses processus de traitement défini, voir contraint, par sa maturation biologique. C'est ce que reflète la figure 8 illustrant de manière schématique cette zone, très comparable au concept vygotkien de zone proximale de développement (Jolles & Crone, 2012).

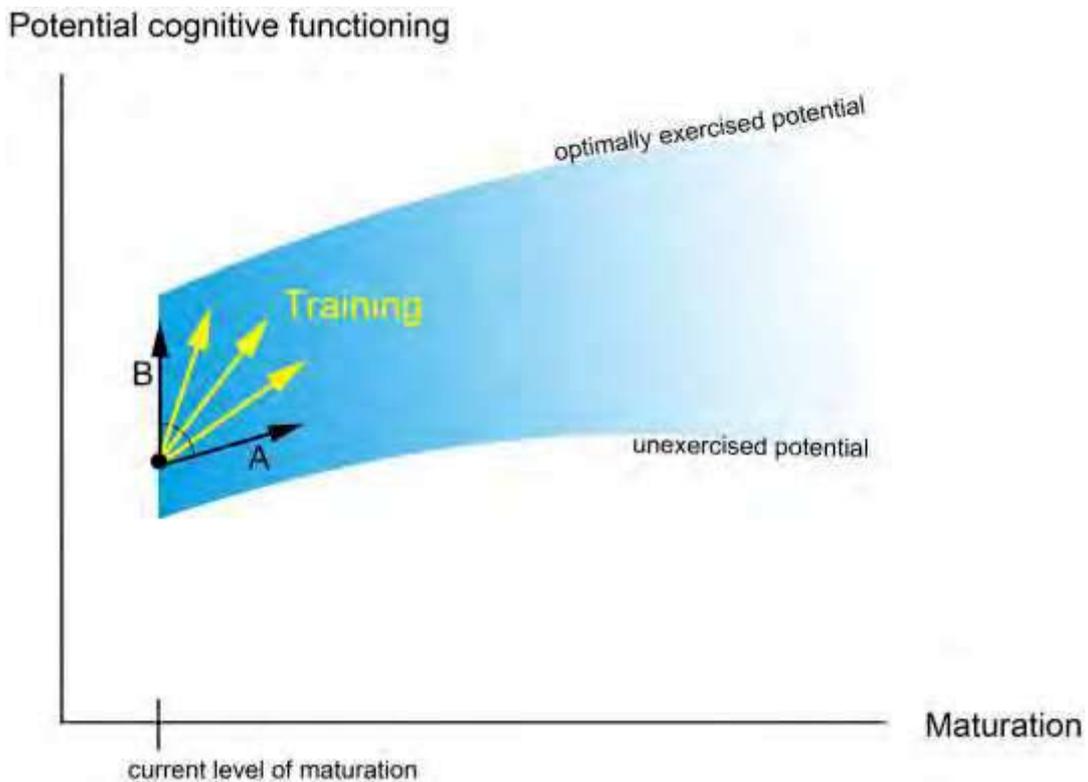


Figure 8. Schéma illustrant la trajectoire développementale et l'amplitude envisageable des bénéfices d'un entraînement en fonction de la maturation et du niveau de fonctionnement cognitif. La zone bleue tend naturellement vers le haut de par l'action conjointe de la maturation biologique et des interactions avec l'environnement. Cependant, l'entraînement permet d'altérer cette trajectoire développementale au travers de deux axes soit A) en accélérant les processus de maturation, et/ou B) en améliorant le fonctionnement et s'éloignant ainsi d'une trajectoire développementale typique. (D'après Jolles & Crone, 2012)

Cette hypothèse que le développement et l'entraînement partagent des processus neuronaux similaires prédit que si un mécanisme (myélinisation, changements au niveau de l'épaisseur de l'axone, du nombre ou de la taille des synapses) est amélioré grâce à l'entraînement, ce mécanisme prédirait également la vitesse du développement au cours de l'enfance (Jolles & Crone, 2012). Par ailleurs, ces auteurs présentent deux axes sur lesquels peuvent s'inscrire les bénéfices résultant d'un entraînement, l'axe de la maturation, soient les bénéfices issues de l'accélération des processus de maturation, ou l'axe du fonctionnement, soient les bénéfices issus d'une optimisation des processus de traitement (Jolles & Crone, 2012).

Il est important que les activités soient originales, c'est-à-dire qu'elles ne soient pas prévisibles et qu'elles contraignent le sujet à engager son contrôle cognitif. Cet aspect vise à éviter la mise en place de stratégies ou d'automatisation dans

la réalisation de la tâche d'entraînement (Moreau & Conway, 2014). Dans la même veine, il est préférable d'augmenter la richesse du support d'entraînement (i.e. en proposant plusieurs tâches stimulant la même aptitude) toujours dans l'objectif d'éviter la mise en place de stratégies basées sur la connaissance de la tâche (Enriquez-Geppert et al., 2013) et ainsi favoriser la transférabilité des bénéfices. Le transfert a d'autant plus de chance d'être étendu si ces activités incluent une diversité de dimensions (cognitive, sociale, émotionnelle) (Diamond & Ling, 2016; Moreau & Conway, 2014; Moreau, Morrison, & Conway, 2015).

5. Approches d'entraînement

Les revues traitant des entraînements cognitifs et de leur efficacité tendent à isoler différentes approches d'entraînement (Bryck & Fisher, 2012; Adele Diamond & Ling, 2016; Karbach, 2015; Lussier, 2009). Nous allons présenter les trois approches

a) Entraînement basé sur les processus : une approche focale

Une première approche, décrite par Lussier (Lussier, 2009) comme "bottom-up", englobe les paradigmes d'entraînement des processus cognitifs (basés en laboratoire). Les connaissances issues à la fois de la psychologie et des neurosciences témoignent de l'utilité de la répétition d'une action dans le processus d'automatisation et donc de gain en efficacité. Des entraînements ont été mis en place pour optimiser le fonctionnement du contrôle cognitif ou de certaines de ses composantes, principalement la MDT, par le biais d'une mobilisation récurrente réalisée dans un contexte stable. Les paradigmes en laboratoire ont l'avantage de pouvoir mettre en avant des bénéfices fins, précis et spécifiques des corrélats cérébraux des processus cognitifs entraînés (Astle, Barnes, Baker, Colclough, & Woolrich, 2015; Houde et al., 2000; Jolles, Van Buchem, Crone, & Rombouts, 2013; Liu, Zhu, Ziegler, & Shi, 2015; Olesen, Westerberg, & Klingberg, 2004; Pietto et al., 2018; Rueda, 2005; Thompson, Waskom, & Gabrieli, 2016). De plus, ce type d'entraînement a l'avantage certain de pouvoir évaluer et quantifier les bénéfices de chacun des paramètres de l'activité proposée (Moreau & Conway, 2014). Des mesures à la fois cognitives, comportementales, électrophysiologiques, d'imagerie ou encore

biologiques tendent à assoir les bénéfices que de tels programmes peuvent engendrer.

Ce type d'entraînement a déjà été associé à des bénéfices quant à l'efficacité des principales dimensions du contrôle cognitif : la MDT (Astle et al., 2015; Holmes et al., 2009; Klingberg et al., 2005), l'inhibition (Rueda et al., 2012; Rueda, Fan, et al., 2004), la flexibilité (Cepeda et al., 2001; Zinke et al., 2012). Elles ont par ailleurs permis de générer des effets de transfert (Karbach & Schubert, 2013; Karbach & Unger, 2014; Kray & Ferdinand, 2013; Titz & Karbach, 2014). Les entraînements qui mobilisent une seule composante du contrôle cognitif (i.e. MDT) sont en général associés à des bénéfices importants et stables dans le temps mais à des effets de transfert réduits (Brehmer et al., 2012; Salminen et al., 2012), alors que pour des entraînements mobilisant plusieurs composantes les effets de transfert bien que faibles peuvent concerner des composantes plus éloignées (Basak et al., 2008; Karbach & Kray, 2009; Prakash et al., 2012). Kray et collaborateurs (Karbach & Kray, 2009; Kray et al., 2012) ont mis en évidence des effets de transfert au moyen d'un entraînement sur de l'alternance entre deux tâches (tâches identiques tout au long de l'entraînement). Ils ont rapporté des effets de transfert proche (tâches d'alternance non-entraînées) ainsi que plus éloigné (mesures d'inhibition, MDT verbale et visuospatiale). Les auteurs mettent en cause l'automatisation des processus impliqués dans la tâche d'entraînement pour expliquer ces effets de transfert. Ils ont également implémenté une variante de l'entraînement au cours duquel les tâches, entre lesquelles les enfants devaient alterner, changeait au long des sessions. Ce groupe a montré des effets de transfert réduits par rapport à celui pour qui les tâches étaient fixes. La littérature à ce sujet reste cependant mitigée (Hulme & Melby-Lervåg, 2012; Melby-Lervåg & Hulme, 2013; Moreau & Conway, 2014; Rapport et al., 2013; Shinaver et al., 2014; Shipstead et al., 2012) mettant notamment en cause une grande similarité entre les tâches entraînées et les tâches évaluées (voir figure 9).

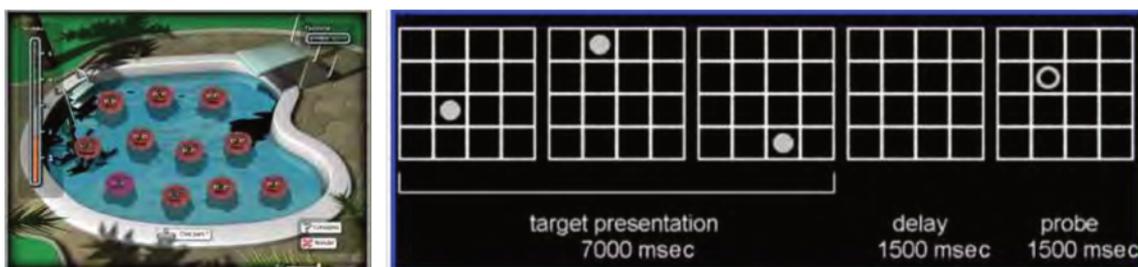


Figure 9. À gauche, illustration d'un exercice proposé par Cogmed, programme d'entraînement de la mémoire de travail. Dans ce mini-jeu il s'agit de se rappeler et de restituer une séquence dictée par des monstres qui deviennent momentanément violet de manière successive. À droite, une des tâches d'évaluation du programme (Holmes et al., 2009) demandant au sujet de restituer une séquence formée par l'apparition momentanée et successive de points au sein d'une matrice.

De plus, la validité écologique et l'applicabilité en milieu naturel des connaissances et bénéfices obtenus au travers de ces paradigmes hypercontrôlés et nécessitant un engagement actif du sujet entraîné dans une tâche redondante est largement remise en question (Bryck & Fisher, 2012; Adele Diamond & Ling, 2016; Moreau & Conway, 2014).

b) Entraînement stratégique : une approche transversale

Un deuxième type d'entraînement est basé sur les stratégies et consiste à renforcer les processus compensatoires, autrement dit à accompagner le développement métacognitif à travers la mise en place de stratégies dans le but d'améliorer l'autorégulation (Bryck & Fisher, 2012; Karbach, 2015; Pozuelos, Combata, Abundis, Paz-Alonso, et al., 2019). Pour Karbach (2015), ces approches ont le potentiel de générer d'important bénéfices, circonscrits cependant à la tâche en question (Colom et al., 2013; Rebok et al., 2007). Un avis qui n'est pas unanime (Bryck & Fisher, 2012). Par exemple, un entraînement stratégique sur l'incitation à la verbalisation interne ("private speech" en anglais) peut générer des bénéfices dans une tâche de flexibilité (DCCS) (Espinet et al., 2013). L'utilisation de stratégies métacognitives a aussi été récemment implémentée au sein d'un programme à destination d'enfants afin de leur fournir des connaissances sur le développement neurocognitif (Lanoë et al., 2015; Rossi et al., 2015). Ce programme a pour objectif d'améliorer les théories implicites de l'intelligence (croyance de base du raisonnement et de la compréhension qui permet à l'enfant de comprendre et

de réagir face à des informations liées à l'apprentissage (Dweck et al., 1995). Un second objectif est de permettre aux enfants de réguler les processus de contrôle et de raisonnement dans le cadre des apprentissages scolaires. Dans une première étude sur des enfants de 7 à 11 ans, cet entraînement a généré des bénéfices au niveau académique sur des performances en lecture et en calcul, et a également permis de faire évoluer les croyances des enfants quant à leurs propres habiletés intellectuelles comme pouvant être modifiées en permanence grâce à l'effort mis en œuvre (Lanoë et al., 2015). Mis en place auprès d'enfants de maternelle, ce type d'approche a également permis des bénéfices en termes de flexibilité, mais également sur un ensemble de tâche requérant des compétences académiques (évaluées au travers la batterie EDA) (Lanoë et al., 2018).

c) Entraînement écologique : une approche globale

Une troisième approche, intervention écologique (ou intervention d'entraînement multi-domaines), est basée sur l'engagement de processus multiples dans un contexte naturel. Le jeu, l'activité physique, la pratique artistique, autant d'activités requérant de la discipline et reposant sur un ensemble de règles concrètes (i.e. instructions) ou implicites (i.e. règles sociales) qui vont mettre en jeu l'ensemble du contrôle cognitif et plus largement l'autorégulation (Bryck & Fisher, 2012). La répétition de la sollicitation du contrôle cognitif au travers de contextes différents est supposé favoriser le processus d'intégration, soit l'interconnexion entre les différents domaines - cognitif, social et émotionnel - au travers desquels le contrôle cognitif intervient pour mettre en œuvre l'autorégulation (Bailey & Jones, 2019). Cela aurait comme conséquence de favoriser l'implémentation du contrôle au sein d'un ensemble varié de contextes, exigence théorique nécessaire à une généralisation des bénéfices. L'approche écologique répond de manière évidente aux critères de validité et de transférabilité des connaissances, les activités étant réalisées en contexte naturel et non en laboratoire. De plus, leur mise en place est souvent plus simple et plus accessible que les précédentes approches ne reposant pas sur l'achat de matériels onéreux (i.e. ordinateurs, logiciels).

Cependant des inconvénients logistiques et méthodologiques sont soulevés (Karbach, 2015; Moreau & Conway, 2014). Ces approches se révèlent plus coûteuses et plus difficiles à évaluer. Le cadre naturel, est pointé comme pouvant nuire au contrôle du protocole. Par ailleurs, la perspective intégrative (intégration de dimensions sociales, cognitives, émotionnelles au sein des activités) peut rendre difficile la spécification concrète de l'origine des bénéfices tant sur le plan des performances comportementales, que des mesures cérébrales (Bryck & Fisher, 2012; Karbach, 2015). Ainsi, les approches écologiques sont reconnues comme ayant le potentiel de générer des bénéfices importants. Cependant, cette approche pourra être critiquée sur le fait qu'il puisse être difficile d'interpréter les résultats et de tirer des conclusions quant aux facteurs ayant influencé les bénéfices. Cette critique se base sur la complexité, la diversité et la variabilité des facteurs d'interactions et des processus en jeu dans leur implémentation (Bryck & Fisher, 2012; Karbach, 2015)

Cependant, d'autres auteurs remettent en question ces conclusions (Diamond & Lee, 2011; Diamond & Ling, 2016; Moreau & Conway, 2014; Moriguchi, 2014). Ils pointent les avantages des entraînements écologiques. Des entraînements qui reposent sur des activités motivantes pour l'enfant au sein desquelles il va prendre plaisir à s'investir. De, plus en tant qu'approche multi-domaine ces entraînements sont les plus à même de mobiliser des processus de traitement variés dans des dimensions (cognitive, sociale, émotionnelle) tout aussi variées et par conséquent de renforcer des réseaux neuronaux plus vastes générant des bénéfices globaux conduisant à une meilleur autorégulation comportementale (Moriguchi, 2014). Par ailleurs, au vu des liens d'interdépendance existants entre compétences socio-émotionnelles et fonctions exécutives (Benavides-Nieto et al., 2017; Riggs et al., 2006), un entraînement mettant en jeu des situations d'interaction, de partage, de négociation (contexte écologique) semble tout à fait à même de générer des bénéfices sur le contrôle cognitif. On peut notamment relever l'implication majeures des FEs (inhibition, planification, flexibilité, mémoire de travail) dans certaines compétences centrales au bon développement socio-émotionnelles

(délai de gratification, théorie de l'esprit) (Carlson & Moses, 2001; Peake et al., 2002).

Le jeu de faire semblant

Parmi les activités retrouvées dans l'approche écologique notre intérêt se porte principalement sur le jeu de faire semblant (« *pretend play* » en anglais). Le jeu de faire semblant est un terme pouvant recouvrir un éventail d'activités dont le jeu sociodramatique, fantastique ou encore le jeu de rôle (Weisberg, 2015). Le jeu de faire semblant consiste à s'investir dans une situation imaginaire caractérisée par des rôles, des scénarios éventuellement avec le soutien d'accessoires en lien avec la scène jouée (i.e. jouer au médecin).

Nous retiendrons cette définition du jeu de faire-semblant énoncée par Deneault et collaborateurs (Deneault et al., 2014) :

« Il (Le jeu de faire semblant) est caractérisé par l'utilisation d'objets substitués servant à en représenter d'autres, par l'élaboration d'un scénario prenant la forme d'un récit plus ou moins suivi et par le fait pour l'enfant d'y tenir un rôle et d'adapter en conséquence ses actions et ses paroles. Le jeu symbolique repose sur un acteur, une réalité et une représentation mentale et il implique la projection intentionnelle de cette représentation dans la réalité »

Le jeu de faire semblant est une activité couramment observée chez les enfants. On l'observe à partir d'un an, dès lors que se met en place la pensée symbolique, soit la capacité de substituer la représentation d'un objet par une représentation symbolique différente sans limitation de la réalité (Nijhof et al., 2018; Westby, 1991). Pour Vygotsky (1933), le jeu de faire semblant est une activité essentielle fournissant des interactions et un terrain d'expérimentation riche pour les enfants d'âge préscolaire permettant de soutenir le développement de capacités telles que l'autorégulation et la créativité. Le jeu de faire semblant sollicite l'intentionnalité, soit le fait de mettre en œuvre un comportement dans un but défini, composante majeure du contrôle cognitif (Bodrova, 2008). La mise en œuvre des différentes dimensions du contrôle

cognitif est sous-tendues par des aspects motivationnels non pas attachés à une récompense mais à un but interne, celui de jouer (L. S. Vygotsky, 1933).

Dans le jeu de faire semblant, l'enfant met en œuvre son contrôle cognitif au travers de l'autorégulation et des compétences socio-émotionnelles, ce qui fait du jeu de faire semblant une activité support au développement cognitif et affectif de l'enfant (Winnicott, 1975). Au cours du jeu de faire semblant, l'enfant mobilise les trois composantes centrales du contrôle cognitif (Berk & Meyers, 2013; Bodrova & Leong, 2013). L'enfant doit i) inhiber des comportements non-pertinents par rapport au rôle qu'il interprète (i.e. ne pas manipuler la trousse du médecin si l'on joue le rôle du malade) et se contraindre aux règles imposées, ii) alterner entre des représentations réelles et des représentations symboliques (i.e. une chaise qui est une voiture), ainsi qu'alterner entre plusieurs rôles au sein du jeu, iii) retenir des informations sur le rôle de chacun des joueurs et les mettre à jour au fur et à mesure du jeu, ainsi que réadapter ses plans de jeu en fonctions des actions des autres joueurs (i.e. "je voulais aller ramasser les légumes puis chercher les œufs pour aller les vendre sur le marché mais comme Sophie ramasse les légumes je vais donc aller chercher les œufs).

Par ailleurs l'interaction avec ses pairs (écoute, communication, coopération, compréhension de l'autre) fait également intervenir son contrôle cognitif. L'enfant soumis à des règles sociales et des règles de jeu doit mettre en œuvre ses aptitudes de contrôle pour adapter son comportement aux attentes de la situation (Winnicott, 1975). Le jeu de faire semblant nécessite d'inférer les états mentaux d'une autre personne. De plus, avec le soutien de l'adulte et du matériel à disposition, il semblerait que, dès l'âge de deux ans, les enfants soient capables de participer à un jeu social impliquant le partage de rôles et la coordination avec un ami dans un jeu de simulation (Harris et al., 1993; Howes & Farver, 1987). Le jeu de faire semblant engage également la régulation de l'autre à travers une position de supervision et de contrôle de la suivie des règles par ses paires. Une régulation qui fait suite à une évaluation de la pratique du jeu par rapport aux règles connues. Ces capacités correspondent aux prémices d'un contrôle métacognitif, une des dimensions de la

métacognition (Moshman, 2018; Schraw & Moshman, 1995). Cette notion correspond à la régulation volontaire de l'action permise par le biais de la surveillance (i.e. la détection d'erreur, incohérence avec la consigne) (Fernandez-Duque et al., 2000; Shimamura, 2000).

Bodrova & Leong ont mis en place un programme éducatif reposant sur l'implémentation du jeu de faire semblant comme activité centrale pour mobiliser de manière ludique, écologique et continue les différentes sous-composantes du contrôle cognitif (Bodrova & Leong, 2006). Des évaluations de ce programme montrent des effets bénéfiques sur l'inhibition (mesurée au moyen d'une tâche de Flankers et de l'effet de congruence à la tâche cœur-fleur) ou bien sur l'ensemble du contrôle cognitif (mesuré au travers de la condition mixte de la tâche cœur-fleur) (Diamond et al., 2007). D'autres bénéfices issues d'observations ou de questionnaires sont également rapportés comme une diminution des problèmes de comportements et de l'agressivité (W. S. Barnett et al., 2008; Blair et al., 2018), une amélioration de l'autorégulation (Blair et al., 2018), des relations plus positives au sein des classes concernées (W. S. Barnett et al., 2008; Blair et al., 2018), et de meilleures performances académiques (W. S. Barnett et al., 2008; Adele Diamond et al., 2007). Cependant, il est impossible d'isoler les effets bénéfiques du jeu de faire semblant au travers de ces programmes qui mobilisent le contrôle cognitif et l'autorégulation au sein de multiples activités, notamment au travers d'autres jeux tels que Jacques a dit (« *Simon says* » en anglais), un, deux, trois soleil (« *Dance and freeze* »), le jeu du miroir (« *The opposite Game* ») sollicitant de manière importante et reconnues les fonctions d'inhibition et de flexibilité (Healey & Halperin, 2012).

Des travaux étudiant spécifiquement le jeu de faire semblant, ont montré qu'il augmenterait les habiletés d'autorégulation (Berk & Meyers, 2013), notamment d'autorégulation verbale des enfants (Krafft & Berk, 1998), qu'il aurait des effets bénéfiques sur leur capacité à attendre (Cemore & Herwig, 2005; Manuilenko, 1975) et sur les composantes du contrôle cognitif comme la MDT ou encore l'inhibition de la réalité (Albertson & Shore, 2008; Carlson et al., 2014; R. Kelly et al., 2011), notamment au travers de l'auto-distanciation ou de l'appropriation

d'un rôle (i.e. « Qu'est-ce qu'aurait fait Batman ? ») (Chung & Silva, 2013; Veraksa et al., 2019; White & Carlson, 2016). Cependant Lillard et collaborateurs (Lillard et al., 2012) ont examiné les travaux s'intéressant aux bénéfices apportés par le jeu de faire semblant, étudié de manière isolée, sur 6 dimensions que sont les aptitudes cognitives non-sociales, la cognition sociale, les compétences sociales, le langage, les compétences narratives et l'autorégulation. L'objectif est de déterminer si, pour le développement de chacun de ces aspects, le jeu de faire semblant représente 1) une activité cruciale, 2) peut être pertinent au même titre que d'autres moyens, ou 3) n'intervient pas dans le développement. De manière générale, et pour l'ensemble de ces catégories, les auteurs concluent à un manque de rigueur dans les études recensées (problème méthodologique, analyses corrélationnelles ne permettant pas la mise en évidence de lien de causalité, manque de répliquabilité ou de clarté). Il est donc impossible de valider le fait que le jeu de faire semblant soit, à lui seul, crucial dans le développement de l'enfant comme le plaide Vygotsky (1933). Les auteurs vont jusqu'à remettre en doute la pertinence du jeu de faire semblant comme moteur du développement de fonctions cognitives comme la résolution de problème, ou la théorie de l'esprit. Ils mettent en évidence que les études en faveur d'un fort impact du jeu de faire-semblant sur le développement exécutif sont manquantes pour établir clairement ce lien (Lillard et al., 2012). Très récemment une méta-analyse s'est intéressée à étudier l'efficacité de différentes interventions ciblant les fonctions exécutives (Takacs & Kassai, 2019). Ces auteurs ont identifié deux études centrées sur le jeu de faire semblant (Smith, 2011; Thibodeau, Gilpin, Brown, & Meyer, 2016). Leurs analyses révèlent qu'aucun de ces paradigmes ne permet d'identifier de bénéfices en MDT, en flexibilité ou sur le contrôle inhibiteur chez des enfants normo-typiques. Ces résultats remettent donc en question les suggestions de Diamond et collaborateur (2016) sur l'intérêt de l'utilisation isolée des activités de jeu de faire semblant dans le cadre d'un entraînement des fonctions exécutives (Diamond & Ling, 2016).

Nous avons cherché à synthétiser les bénéfices sur le contrôle cognitif qui pouvaient être obtenus par une intervention basée spécifiquement sur le jeu de faire semblant dans le cadre d'une approche proposant un entraînement de

composante(s) du contrôle cognitif ou de l'autorégulation auprès de jeunes enfants (jusqu'à 6 ans). Six études correspondent à ces critères (Baron, Malmberg, Evangelou, Nesbitt, & Farran, 2019; Dansky, 1980; Smith, 2010; Thibodeau et al., 2016; Traverso et al., 2015; Veraksa et al., 2019). Ces études mettent en œuvre un entraînement certes, écologique, mais contenant également des éléments appartenant à l'approche stratégique. En effet, ces auteurs enseignent aux enfants à réfléchir sur leur jeu, soutiennent les enfants dans la structuration et la planification de leur jeu (Thibodeau et al., 2016; Traverso et al., 2015) et les encourage à mettre en œuvre une réflexion métacognitive sur la façon dont ils ont appliqué des stratégies de gestion de problème au cours du jeu (Traverso et al., 2015).

Ces études sont décrites dans le tableau 1 (ci-après) et discutées dans le prochain paragraphe.

Table 1. Revue des entraînements du contrôle cognitif basés sur des activités de jeu en contexte social chez l'enfant d'âge préscolaire. Les bénéfices reportés en gras concernent des tâches sollicitant le contrôle cognitif.

Réf.	Echantillon	Constitution des groupes	Programme d'entraînement	Outils de mesure	Détails des bénéfices
Traverso et al. 2015	N = 75 5- 6 ans SES bas	N=43 grp exp N=32 grp ctrl (activité scolaires classiques)	Jeux de rôle d'après des histoires 12 sessions de 30 minutes sur 1 mois	<ul style="list-style-type: none"> - Tâche de délai de gratification - Gift wrap task - Circle drawing task - Preschool matching familiar figure task - Arrow flanker task - Go/No-Go task - Dots task - Backward word span - Mr. Cucumber - Keep track - Attention and hyperactivity symptoms scale - Colored Progressive Matrices 	<ul style="list-style-type: none"> - Bénéfices de l'entraînement sur activité ctrl - Délai de gratification - Circle Drawing Task - Preschool Matching Familiar Figure Task (precision) - Arrow Flanker Task (TR) - Dots T ask (precision) - Backs words Word Span. - Keep Track
		Groupes de 5 enfants			
Thibodeau et al. 2016	N = 110 (51 garçons) 3 - 5 ans SES moyen	N=39 grp exp 1 N=32 grp exp 2 N = 39 ctrl (activité scolaires classiques)	Jeu de faire semblant autour de scénarios/thématiques 25 sessions de 15 minutes tous les jours d'école sur 5 semaines	<ul style="list-style-type: none"> - EVIP - Forward digit span task - DCCS - Tâches de Stroop (Day/night & Snow/grass) - Fantasy Orientation questionnaire - Imaginative Play Preposition Interview - Imaginary Companion Interview - Impersonation Interview - Toy Phone Task 	<ul style="list-style-type: none"> - Bénéfices de l'entraînement (exp1) sur autres activités : - Plus grande facilité et plus grande propension au jeu fantastique - Bénéfices pour le groupe exp1 - Digits (plus de rappels de digits) - DCCS (Moins d'erreur après reconfiguration de règle)
		Groupes 3 à 6 enfants ctrl : Jeu classiques (ballons, ...)	<ul style="list-style-type: none"> exp1 : Jeu de faire semblant imaginaires ctrl : Jeu classiques (ballons, ...) 		
Dansky 1980	N = 36 (45 garçons) 4 - 6 ans	N=12 grp SD N=12 grp FP N=12 grp ET	3 sessions de 30 minutes par semaine pendant 3 semaines 3 Groupes de 4 enfants par modalité d'entraînement	<ul style="list-style-type: none"> - Story Sequence - Story Picture - Rappel d'histoire - Alternate Uses Task - Curiosity Box - Rappel Curiosity Box - Expression verbale - Evaluation du jeu de faire semblant 	<ul style="list-style-type: none"> - Bénéfices de l'entraînement (SD) sur autres activités : - compréhension verbale - mémoire à court terme - tâche d'utilisations alternatives - rappel d'histoire - Story Picture - Bénéfices pour le groupe SD : - Jeu plus mature après entraînement (rôle, interactions verbales, imagination, préparation du jeu) - Bénéfices de l'entraînement (ET) sur autres activités : - description d'item du test (Curiosity Box)
		Groupes de 2 enfants	<ul style="list-style-type: none"> SD : Socio-dramatic play FP : Free play ET : Exploration Training 		

Réf.	Echantillon	Constitution des groupes	Programme d'entraînement	Outils de mesure	Détails des bénéfices
Veraksa et al., 2019	N = 80 (45 garçons) 5 - 6 ans	N=20 grp protagoniste N=20 grp sage N=20 grp méchant N=20 grp ctrl	T1 : pré-test. T2 : test avec 4 conditions de rôle (aucun, protagoniste, méchant et sage) T3 : post-test Le T2 correspond à une session de test où l'enfant joue un rôle pendant 15 minutes (protagoniste, méchant et sage) avec des traits spécifiques (bienveillance, malveillance, compétence)	- Dimensional Change Card Sort Task (DCCS) - Deux sous-tests de la NEPSY- II - Statue (tâche d'inhibition motrice) - Inhibition (tâche d'interférence stimulus-réponse)	Bénéfices des grp sage & ctrl sur les autres grp : - Performance au DCCS entre T1, T2 et T3 Bénéfices des grp sage, méchant & ctrl sur l'autre grp : - Score d'inhibition (composite de TR et précision au sous-test Inhibition) entre T1, T2 et T3
Baron et al., 2019	N = 646 (342 garçons) 4 - 7 ans SES bas	Pas de groupe contrôle Evaluation pré/post	Mise en œuvre d'activités isolées de jeu de faire semblant issus du programme Tools of the Mind 3 modalités de fréquence - Rare - Fréquence - Quotidienne Evaluation de la fidélité de mise en œuvre	- Score exécutif composite - Dimensional Change Card Sort (DCCS) - Heads-Toes-Knees-Shoulders (HTKS) - Peg Tapping - Block de Corsi - Copy Design - Cooper-Farran behavioral rating scale (CFBRS) - Self-regulation assessor rating (SAR)	L'implémentation du jeu de faire semblant issu de TOM n'est associée à aucun bénéfices concernant le fonctionnement exécutif, ni pour l'observation de l'autorégulation comportementale. De plus, la fidélité et la fréquence de sa mise en œuvre prédit des scores d'autorégulation rapporté par les professeurs inférieurs en fin de programme
Smith et al., 2010	N = 52 5 - 6 ans 81% SES bas	N=24 grp exp N=28 grp ctrl (classe d'expression artistique)	13 sessions de 45/50 minutes réparties sur 2 mois Au début du programme, jeu de rôle à partir d'histoires issues de livres ; puis issues de scénarios élaborés par les enfants	- 3 sous-tests de la NEPSY - II - Inhibition - Theory of Mind - Auditory Attention	Aucun bénéfice de l'entraînement exp sur l'activité ctrl

Ce tableau ne laisse paraître aucune évidence de l'impact d'ateliers de jeu de faire semblant sur le développement de l'autorégulation et/ou du contrôle cognitif. Les méthodes d'évaluation ainsi que les résultats divergent fortement d'une étude à l'autre. Parmi ces travaux, quatre sont particulièrement comparables en terme de contenu et de dosage (Thibodeau et al., 2016; Traverso et al., 2015 ; Baron et al., 2019 ; Smith et al., 2010). Or, seuls les résultats de Traverso et collaborateurs (2015) affichent clairement une efficacité de l'entraînement sur l'ensemble des fonctions exécutives (inhibition, flexibilité et MDT ; avec des tailles d'effet comprise entre .35 et .70).

Traverso et collaborateurs (Traverso et al., 2015) ont étudié les bénéfices d'activités tournées autour du jeu social encadré par l'adulte (planification et jeu). Sur cet aspect, leur protocole d'intervention se confond avec les autres protocoles précédemment mentionnés. Cependant, le protocole de Traverso et collaborateurs (Traverso et al., 2015) se démarque par différents aspects : assistance à la résolution de conflit, support à la pratique de l'autorégulation et sollicitation des habiletés métacognitives. Les enfants devaient estimer l'implication de leurs fonctions exécutives au cours de la session sur un calendrier. Ceci ayant l'avantage de permettre une autoévaluation, une comparaison par rapport aux autres jours (supervision, *monitoring* en anglais) et une réflexion sur les stratégies qu'ils ont pu mettre en œuvre et qu'ils ont jugé aidantes au cours de la session. De ce fait, cet entraînement est à la fois écologique et stratégique. Une attention particulière était portée à la valorisation de l'enfant notamment au travers de félicitations. En plus d'une sollicitation des EFs, ce protocole basé sur le jeu de faire semblant entraînait donc plus largement l'autorégulation et les compétences socio-émotionnelles. Les protocoles présentés dans les trois autres études, qui ne reportent pas de bénéfice de l'entraînement sur le groupe contrôle au niveau des EFs ou de l'autorégulation, ne font pas état de sollicitation métacognitive dans le contenu de leur entraînement.

Ainsi, au moyen de telles mesures (comportementales & cognitives) il reste difficile mettre en évidence l'intérêt du jeu de faire semblant dans le cadre d'un

entraînement écologique du contrôle cognitif. Cependant, ces études semblent supporter l'intérêt du jeu de faire semblant dans un contexte précis de structuration et d'accompagnement par l'adulte dans la réflexion et la planification du jeu en groupe. Les approches stratégiques et écologiques semblent pouvoir se conjuguer et permettre de faire du jeu de faire semblant une solution intéressante pour améliorer l'implication des compétences du contrôle cognitif au service de la gestion du comportement, autrement dit pour bénéficier à l'autorégulation comportementale, compétence cruciale pour l'entrée à l'école et l'insertion dans les apprentissages formels. Ces études soulignent également la facilité de mise en place de ce type d'intervention en milieu scolaire et le faible coût financier et humain que leur implémentation représente.

6. Mécanismes neurocognitifs en jeu dans l'entraînement

Le principe de l'entraînement repose sur le phénomène de plasticité cérébrale, soit la capacité du cerveau à modifier sa structure de manière réactive (Lövdén et al., 2010; Rosenzweig & Bennett, 1996). Ces changements s'opèrent via la formation et/ou l'élimination de synapses conduisant à la modification des réseaux neuronaux préexistants (Trachtenberg et al., 2002). Les études en neuro-imagerie permettent d'identifier les corrélats neuronaux (variables en fonction des études) des changements induits par l'entraînement. Dans la littérature, trois principaux patterns de résultats sont rencontrés (Kelly & Garavan, 2005; Poldrack, 2000) :

- Une diminution de l'activation ou une réduction de l'étendue spatiale des activations suggérant une augmentation de l'efficacité neuronale permise par un réseau de neurones mieux connecté (Miller & Desimone, 1994)
- Une expansion spatiale ou une augmentation de l'activation cérébrale reflétant un recrutement cortical plus étendu et complexe (Pietto et al., 2018), pouvant là aussi témoigner d'un développement de la connectivité neuronale

- Une restructuration fonctionnelle des réseaux cérébraux soit la redistribution d'une partie de l'activité sous-jacente à une fonction spécifique vers une nouvelles zone corticale (Petersen et al., 1998)

Cependant, il est important de préciser que les éventuels changements observés au niveau de l'activité neuronale, ou au niveau des performances comportementales n'indiquent pas nécessairement une amélioration des fonctions cognitives d'intérêt (Enriquez-Geppert et al., 2013).

Dans sa revue sur les bases neuronales de l'entraînement cognitif et du développement de 2016 (revue qui recense des données principalement issues des approches basées sur les processus), Klingberg (2016) schématise l'interaction de trois facteurs sur le développement neurocognitif (illustrée en figure 10). La maturation, représentant les modifications développementales d'ordre strictement biologique survenant principalement au début de l'enfance (i.e. croissance cérébrale, modifications anatomiques), la spécialisation interactive, soit la mise en place des réseaux neuronaux en réponse aux demandes de l'environnement (phénomène accru lors de la petite enfance (Johnson, 2000)) et l'entraînement - l'acquisition de compétences résultant d'une plasticité existante tout au long de la vie intervenant dans toute mise en place d'apprentissage et résultant en la consolidation de réseaux neuronaux (Klingberg, 2016).

Si l'entraînement permet de soutenir l'organisation neuronale dépendante du processus de spécialisation interactive, un pont apparaît alors entre le modèle de Jolles & Crone (2012, figure 8) et celui de Klingberg (2016, figure 10).

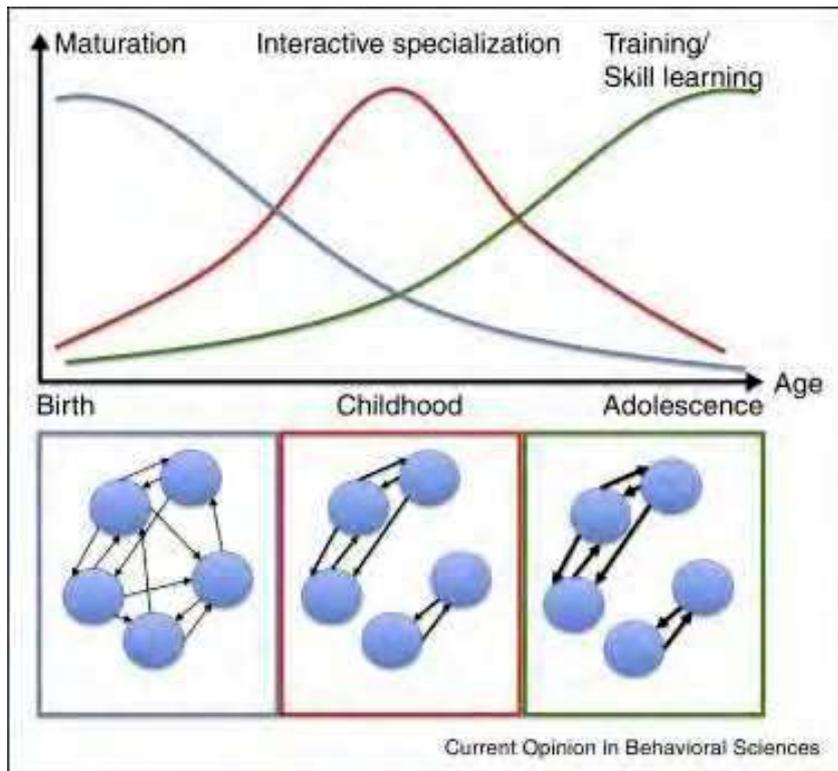


Figure 10. Schéma de la mise en place des réseaux neuronaux sous l'influence combinée de trois processus clé du développement (en bleu la maturation, en rouge la spécialisation interactive et en vert l'entraînement/l'apprentissage). En haut les courbes représentant l'importance de chacun des facteurs énoncés sur le développement neuronal à une certaine période. En bas sont présentés les changements cérébraux hypothétiques associés à ces trois facteurs du développement neurocognitif. Les disques représentent les aires corticales ou sous-corticales reliées par des connexions axonales représentées par des flèches. L'épaisseur des flèches représente la force de ces connexions et donc l'impact fonctionnel de l'activité d'une région sur une autre. Dans cette illustration les mécanismes en jeu pourraient être la myélinisation, des changements au niveau de l'épaisseur de l'axone, du nombre ou de la taille des synapses (Klingberg, 2016)

En effet les deux soutiennent qu'au travers de l'entraînement il est possible d'accélérer les mécanismes physiologiques dépendant du phénomène de maturation. Au travers du gain développemental ainsi induit on permet alors une augmentation du champ de compétence ainsi que des performances atteignables en lien avec la compétence entraînée (Jolles & Crone, 2012; Klingberg, 2016). Cependant l'approche de Jolles & Crone distingue les bénéfices issus de l'accélération des processus de maturation, des bénéfices issus d'une optimisation des processus de traitement.

La combinaison de ces deux modèles est représentée dans la figure 11 qui montre deux cas de figure prototypiques, un premier cas sans entraînement (en haut) et un second avec entraînement (en bas). Selon les auteurs, un entraînement précoce lors de l'enfance (représenté par une pente de la ligne verte plus accrue) induirait une augmentation du processus de spécialisation interactive (ligne rouge) qui soutiendrait le processus de maturation permettant la mise en place de réseaux plus mature de façon plus précoce. Ceci aurait également pour effet d'augmenter le potentiel de fonctionnement cognitif (en jaune) de façon plus précoce et plus intense.

Afin de confronter ces hypothèses nous réalisons une revue de la littérature sur

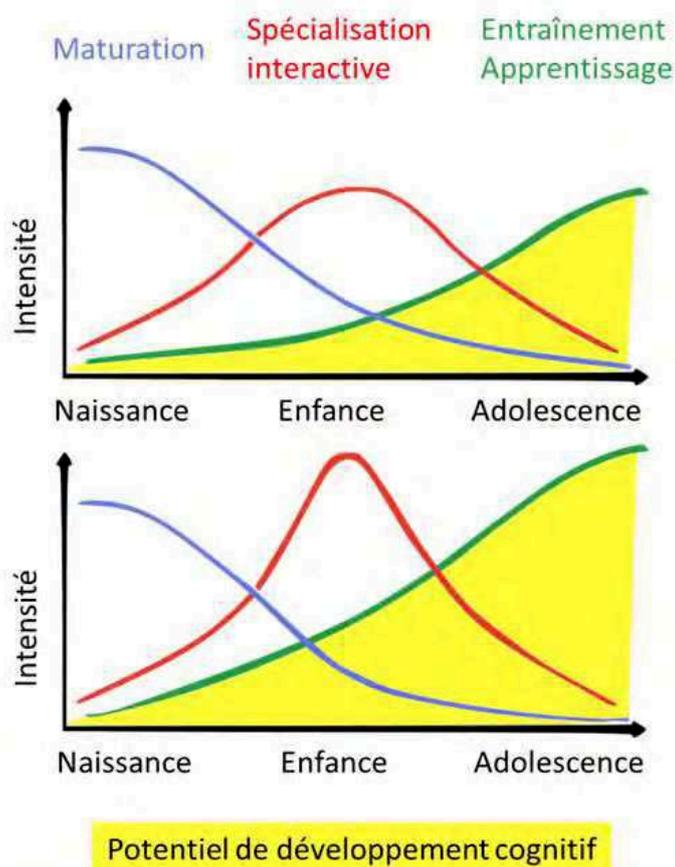


Figure 11. Illustration du phénomène d'augmentation du potentiel de développement cognitif (Jolles & Crone, 2012) au vu de la spécialisation interactive accrue (accélérant le processus de maturation) induite par la mise en place d'un entraînement (Klingberg, 2016). Ce schéma illustre qu'au travers de l'entraînement (ou de stimulation) la possibilité de s'insérer dans les apprentissages est accrue de par un développement plus mature.

les entraînements du contrôle cognitif (ou d'une de ses composantes) dans une approche basée sur les processus, stratégique ou écologique, sur des enfants d'âge préscolaire et s'intéressant aux bénéfices d'un point de vue à la fois

comportemental et cérébral. Le tableau 2 décrit les aspects et résultats majeurs des études correspondant à ces critères.

Table 2. Revue des entraînements du contrôle cognitif utilisant des mesures cérébrales chez l'enfant d'âge préscolaire en fonction du type d'approche

	Echantillon	Constitution des groupes	Programme d'entraînement	Mesure d'imagerie / électrophysiologie	Outils de mesure	Résultats	
Rueda et al., 2005	Basé sur les processus	<p>Exp 1 : N = 24 enfants (4 ans) Exp 2 : N = 25 enfants (4 ans) Exp 3 : N = 26 enfants (6 ans)</p> <p>ANT : 4ans : N (exp 1 & 2) = 36 enfants (18 entrainés & 18 contrôles) 6ans : N = 25 enfants (13 entrainés & 12 contrôles)</p> <p>Exp 2 : Groupe contrôle : Oui N = 12 (actif: visionnage de vidéos)</p> <p>Exp 3 : Groupe contrôle : Oui N = 12 (actif: visionnage de vidéos)</p> <p>EEG : 4ans : N (exp 1 & 2) = 20 enfants (9 entrainés & 11 contrôles) sur 40 6ans : N = 16 enfants (8 entrainés & 8 contrôles) sur 24</p>	<p>Randomisation : Oui</p> <p>Exp 1 : Groupe contrôle : Oui N = 12 (passif)</p> <p>Exp 2 : Groupe contrôle : Oui N = 12 (actif: visionnage de vidéos)</p> <p>Exp 3 : Groupe contrôle : Oui N = 12 (actif: visionnage de vidéos)</p>	<p>Entraînement réalisé sur 5 jours (répartis sur 2-3 semaines)</p> <p>Entraînement et activité contrôle active réalisés au laboratoire en solitaire dans un endroit calme en présence d'un expérimentateur</p> <p>Exercices informatiques ciblant surveillance/anticipation, attention focale/discrimination, résolution de conflit, contrôle inhibiteur, attention soutenue</p> <p>Difficulté incriminée, forme adaptée à l'enfant</p>	<p>EEG (128 électrodes)</p> <p>Etude de la N2 en Fz, FCz, Cz en condition Compatible vs Incompatible</p>	<p>- Delay of gratification</p> <p>- Children Gambling Task</p> <p>- K-BIT</p> <p>- Fanker task Fish (en EEG)</p> <p>- Questionnaire de tempérament (CBQ)</p>	<p>- ANT : Pas d'effet de l'entraînement au niveau comportemental, mais réduction de l'effet de conflit chez les deux groupes</p> <p>- K-BIT : effet de l'entraînement significatif pour le groupe entraîné en post (pour 4 ans seulement)</p> <p>- N2 est plus précocé en Cz (comme adulte) chez 6ans entrainés que non entrainés qui eux montre une N2 plus antérieure (Fz).</p> <p>- N2 plus négative dans situations d'incompatibilité versus compatible en Fz (similaire au 6 ans non entrainés) pour enfants de 4 ans</p>
Rueda et al., 2012	Basé sur les processus	<p>N = 37 enfants (5 ans)</p> <p>Randomisation : pseudo (sur genre, intelligence, ANT performances)</p> <p>Groupe contrôle : oui (actif : visionnage de vidéos)</p> <p>Groupe expérimental : N=19</p> <p>Groupe contrôle : N=18</p>	<p>10 sessions de 45 minutes sur 5 semaines (2 sessions hebdomadaires) soit 7h30</p> <p>Entraînement solitaire devant ordinateur dans une pièce silencieuse</p> <p>Exercices ciblant surveillance/anticipation, attention focale/discrimination, résolution de conflit, contrôle inhibiteur, attention soutenue</p> <p>Difficulté incriminée: forme adaptée à l'enfant.</p> <p>Activité contrôle réalisée dans conditions similaires mais avec du visionnage de vidéos</p>	<p>EEG (128 électrodes)</p> <p>Etude de la N2 au sein de la fenêtre 300-700ms au travers de deux mesures: amplitude (moyenne autour du peak le plus négatif) et latence en AF, Fz, FCz, Cz en condition Compatible vs Incompatible</p>	<p>- Delay of gratification</p> <p>- Children Gambling Task</p> <p>- K-BIT</p> <p>- Fanker Task Fish (en EEG)</p> <p>- Questionnaire de tempérament (CBQ)</p>	<p>- ANT : Pas d'effet de l'entraînement au niveau comportemental, mais réduction de l'effet de conflit chez les deux groupes</p> <p>- K-BIT : effet de l'entraînement significatif pour le groupe entraîné en post et marginal en post2 pas de différence pour groupe contrôle</p> <p>- Gambling Task: augmentation des choix avantageux pour le groupe entraîné en post2 (2 mois après post) /pré</p> <p>- Delay: pas d'effets</p> <p>- N2 est plus précocé et postérieure chez sujets entrainés, effet maintenu en post2 avec une déflexion de N2 plus importante que sujets contrôles</p>	
Astle et al. 2015	Basé sur les processus	<p>N = 33 enfants (âgés de 8 à 11 ans)</p> <p>27 enfants dans les analyses</p> <p>groupe expérimentale N = 13 (3 garçons)</p> <p>groupe contrôle N = 14 (7 garçons)</p>	<p>Randomisation : Oui</p> <p>Groupe contrôle : Oui (actif: Placebo)</p> <p>Entraînement mixte sans complexification (niveau bas)</p> <p>14h d'entraînement</p> <p>Programme de jeux informatiques à difficulté incriminée sollicitant la MDT</p>	<p>MEG</p> <p>Enregistrement de l'activité basale (yeux fermés) pendant 9 minutes</p>	<p>- Quatre dimensions de la AWMA</p> <p>- Forward digit span task</p> <p>- Backward digit span task</p> <p>- Dot matrix task</p> <p>- Spatial Span task</p>	<p>- amélioration de MDT et de la MCT uniquement chez grp expérimental</p> <p>- différence après entraînement (mais pas avant) pour le groupe entraîné dans la connectivité des réseaux frontopariétaux de l'hémisphère droit et du cortex occipital latéral gauche.</p> <p>- l'augmentation de la connectivité va de paire avec des bénéfices en MDT</p>	
Liu et al., 2015	Basé sur les processus	<p>N = 34 enfants (4 à 5 ans)</p> <p>groupe expérimental N = 19 (11 garçons)</p> <p>groupe contrôle N = 15 (6 garçons)</p>	<p>Group contrôle : Oui (actif: Activité de coloriage sur tablette (support similaire) réalisée dans un dosage inférieur au groupe expérimental <1h versus 3h)</p> <p>4 sessions de 15 minutes par semaines pendant 3 semaines soit 3 heures de jeu 'Fruit Ninja' sur tablette</p>	<p>EEG (32 électrodes)</p> <p>Etude de l'amplitude moyenne de la N2 en Fz, Cz et Pz sur la fenêtre 320-400 ms) pour les essais Go versus NoGo</p>	<p>- Go-NoGo (en EEG)</p> <p>- Day-Night stroop task</p> <p>- Digit span (WPPSI-III)</p> <p>- Test des matrices progressives de Raven</p>	<p>- Go-NoGo : Pas d'effet</p> <p>- Stroop : Pas d'effet</p> <p>- Raven's : tendance d'un effet principal du groupe</p> <p>- Digit span : Pas d'effet</p> <p>- N2 en Cz : effet d'interaction Genre x Groupe (N2 plus large pour les filles du groupe entraîné (Pas d'effets pour les garçons du groupe entraîné)</p> <p>- N2 en Fz et Pz : Pas d'effet</p>	

Basé sur les processus

N = 69 enfants (5-6 ans, 29 garçons)	Randomisation : Oui	Jeux informatiques mobilisant le contrôle inhibiteur, la mémoire de travail et la flexibilité cognitive créés sur le modèle de tâches neuropsychologiques	EEG (14 électrodes)	- Tâche de GoNoGo (en EEG)	- Pas d'amélioration des temps de réponse ni de la précision en Go après entraînement. - Pas d'effet de l'entraînement sur le nombre de fausses alarmes ou sur le score d'efficacité (bonnes réponse - fausses alarmes). - Augmentation de la N2 en F3/F4 non constatée dans le groupe contrôle. - Moindre différence d'amplitude de la P2 entre essais Go et NoGo chez le groupe contrôle
Analyse sur 62 enfants	Groupe contrôle: Oui (actif)		Etude de la latence et de l'amplitude moyenne de P2 (ERP) identifiée au sein de la fenêtre (270-320ms) et de la N2 identifiée au sein d'une fenêtre individuelle de 300ms déterminée par le pic positif de P2 enregistrée en position F3 et F4 en condition Go versus NoGo. La différence entre la N2 post et pré a permis l'obtention d'un Déta N2.		
Niveau socio-économique bas					
Contrôle sur le niveau d'éducation maternel					
Analyse EEG sur 44 enfants					

Stratégique

Exp 1: N = 29 enfants (4 ans)	Randomisation : Oui	L'entraînement consiste à mettre en place une démarche réflexive lors de la réalisation du DCCS (méthode de Kloo & Penner, 2003). Les enfants sont invités à penser et formuler leur choix de classification lors de la réalisation de la tâche.	EEG (128 électrodes)	- Relative clause task - Tâche de fausses croyances - DCCS - Compréhension du vocabulaire - PPVT-III	- L'entraînement réflexif a généré des bénéfices (précision) sur la tâche DCCS et fausses croyances dans l'exp 1 et sur la tâche de DCCS uniquement dans l'exp 2. - L'effet du dosage entre l'exp 1 et 2 n'est pas significatif. - Effet du temps sur le nombre d'erreur à la tâche DCCS (réduction en post) - Effet de l'entraînement sur le nombre d'erreur sur la tâche DCCS(bénéfice du groupe expérimental supérieur à celui du groupe contrôle actif) - Amélioration sur essais post-switch (moins d'erreurs) uniquement pour le groupe expérimental le groupe expérimental après entraînement - Effet du temps sur les temps de réponse (plus lents en post) sans effet du groupe - réduction de l'amplitude de la N2 pour le groupe expérimental en AFz, Fz et FCz mais pas en Cz. - Pas de changement au niveau des latences de la N2, localisation des source indique une activation cingulaire centrale gauche. - La réduction de l'amplitude de la N2 est corrélée à l'augmentation du temps de réponse pour les essais post-switch ($r = .33$) - La réussite après intervention à la tâche DCCS est associée à la direction de l'amplitude de la N2 (les enfants qui réussissent tendent à montrer une N2 d'amplitude plus faible)
Exp 2: N = 28 enfants (dans)	Groupe contrôle : Oui				
Exp 3 N = 56 enfants (4 ans)					
	Exp. 1: Groupe expérimentale: N = 15 Groupe contrôle: Oui (actif) N=14				
	Exp. 2: Groupe expérimentale: N = 14 Groupe contrôle: Oui (actif) N=14				
	Exp. 3: Groupe expérimentale = 20 Groupe contrôle = Oui (actif & passif) N = 36				
	exp 1 & 2 : relative clause training. exp 3 : - corrective feedback - modale simple	Exp 1: Entraînement identique à Kloo & Penner (2003) 2 sessions de 15 minutes Exp 2 : Entraînement réduit 1 session de 15 minutes Exp 3 : Entraînement réduit et informatisé 1 session de 15 minutes			
	activité contrôle de l'exp 3 Tâche de description relative où l'enfant doit à la suite de l'expérimentateur décrire une image différente de ce dernier Activité contrôle de l'exp 3 (Groupe contrôle actif) Utilisation d'un retour sur la performance réalisée (corrective feedback)				

Bruce et al., 2009

Stratégique

N = 46 enfants (4-7 ans, 25 garçons) Analyse sur 34 enfants	Groupe expérimental MTEC-P: N=10 Groupe contrôle actif RFC: N=13 Groupe contrôle passif: N = 11	MTEC-P (Multidimensional Treatment Foster Care for Preschoolers). L'intervention procurée par l'ensemble des intervenants pédagogiques (parents, équipe éducative, consultants pédagogiques) consiste à apporter à l'enfant des renforcements positifs et expliciter les conséquences de ses actes négatifs afin dans une dynamique d'amélioration des capacités de régulation.	EEG (8 électrodes) Etude de l'amplitude de - NI (50-150 ms), - P2 (160-260 ms), - FRN (feedback-related negativity) (280-480 ms) - ERN (error-related negativity) (-20-120 ms) - Pe (error-positivity) (50-175ms)	- Flanker Task	- Essais incompatibles & essais compatibles (TR et précision) - Ralentissement post-erreur - ERN plus négative en Fz pour le groupe contrôle par rapport aux deux autres groupes. - ERN en Fz & ERN Cz > ERN Pz pour le groupe RFC - ERN en Fz > ERN Cz > ERN Pz pour groupe MTEC-P et CC - L'amplitude de Pe est plus positive en Cz et Pz pour les essais incorrects - Pe CC > Pe MTEC-P & CC - L'amplitude de NI est plus large pour essais incorrects vs corrects - L'amplitude de NI est plus négative en Cz et Pz que en Fz - NI MTEC-P & NI CC > NI RFC - L'amplitude de P2 est plus large pour essais corrects vs incorrects pour MTEC-P & CC - L'amplitude de P2 Fz & P2 Cz > P2 Pz - FRN plus négative pour essais incorrects que essais corrects (différence plus importante pour groupes MTEC-P et CC)
--	---	--	---	----------------	--

Pozuelos et al. 2019

Stratégique

N = 107 Analyse sur 96 enfants	Randomisation : Oui Expérimentateur aveugle Groupe expérimentale 1 : Accompagnement métacognitif sur tâche informatisée à difficulté incrémentielle (MT) Groupe expérimental 2 : Retour correctif sur tâche informatisée à difficulté incrémentielle (T) Groupe contrôle passif : Tâche informatisée à difficulté fixe et faible (C)	Gp 1 : Entraînement combiné Stratégie et informatisé. Gp 2 : Entraînement informatisé	EEG (128 électrodes) Etude de l'amplitude et de la latence de l'ERP lié au conflit (450-850 ms) en frontal (Fz) et central (Fz/Cz) composante relative à la N2	- Sous-échelles Matrices et Verbale (K-Bit) - Simon Says Tasks - Rappel de séquence inversé (WISC) - Flanker task Robot (en EEG)	- Les enfants du groupe MT ont commis moins d'erreurs et ont eu besoin de moins d'essais pour accomplir les entraînements - Augmentation du score d'intelligence pour les grp MT et T, mais augmentation uniquement pour le grp MT sur le score standardisé. - Effet large du grp MT par rapport au grp C - Effet modéré du grp MT par rapport au grp T - Effet faible du grp T par rapport au grp C - Effet marginal d'augmentation pré-post pour le score de la MDT pour MT - Réduction d'erreur en tâche de Simon pré-post pour MT et T - Pas d'effet sur le score de conflit à la tâche de Flanker - Analyse EEG par rapport à la cible - Plus grande différence d'amplitude de l'ERP en central entre essais compatibles et incompatibles pour groupe MT et T - Réduction de la latence de l'ERP liée au conflit pour les groupe MT et T en central - Le groupe MT uniquement montre une augmentation de l'effet de conflit en central en post versus pré, résultat qui prédit les gains en score standardisé d'intelligence - Transfert proche (Simon) pour les deux entraînements expérimentaux - Transfert étendu (tâches de MDT et intelligence fluide)
-----------------------------------	---	--	---	---	---

Moriguchi et al., 2015

Stratégique

Exp 1 : N = 32 (3-4 ans) Analyses sur 24 enfants (11 garçons) Exp 2 : N = 19 enfants (5 ans) Analyses sur 19 enfants (7 garçons)	Exp 1 : Randomisation : Oui Groupe contrôle : Oui Répartition de l'échantillon en 2 groupes avec ou sans interaction avec une poupée Exp 2 : Groupe contrôle : Non Subdivision de l'échantillon selon l'expérience d'ami imaginaire (AI) Groupe avec AI : N = 9 enfants Groupe sans AI : N = 6 enfants	Exp 1 & 2: Adapter une position de professeur par rapport à une poupée/manchette afin de lui expliquer les règles de la tâche DCCS ("jeu de faire semblant/activité réflexive") Dans l'exp 2 la réalisation répétée de la tâche peut être assimilée à un entraînement.	Exp 2: NI/FS (16 électrodes) Aggrégation des électrodes 2, 4 et 5 (équivalent à la position F4) et des électrodes 11, 13 et 14 (équivalent à la position F3) régions dorsolatérales préfrontales	-DCCS (non informatisée)	- Effet principal de la session (pré/post) et de la phase de la tâche (preswitch/postswitch) - Pas d'effet du groupe Exp 2 - Augmentation des performances en sessions 2 - Augmentation de l'activation du cortex préfrontal gauche sans effet de latéralité, phase ou session - Effet d'interaction Latéralité x Session révélant un effet principal simple dans le cortex préfrontal gauche uniquement avec une activation plus importante en sessions 2 qu'en session 1 - Amélioration plus marquée pour le groupe avec AI (mais pas sans AI).
---	--	---	---	--------------------------	---

N = 71 enfants (4-6 ans) Analyse sur 48 enfants	Randomisation : Non Groupe contrôle : Non Groupe expérimental 1 : N = 24 Entraînement d'art visuel (A) Groupe expérimental 2 : N = 24 Entraînement musical (M)	Deux entraînements (sur support informatisé visuellement similaires) mais présentés en groupe (projection sur écran) et animés par un professeur. - M : Combinaison de tâches motrice perceptuelle et cognitives incluant un entraînement du rythme, de la tonalité, de la mélodie, de la voix de des concepts musicaux basiques - A : Entraînement ciblant les compétences visuo-spatiales (forme, couleur, ligne, dimension, perspective) L'entraînement se déroule en 2 sessions quotidiennes de 45 minutes 5 fois par semaines pendant 4 semaines, soit 15h d'entraînement. Les évaluations sont réalisées en laboratoire avant entraînement et 5 à 20 jours après entraînement.	EEG (64 électrodes) Etude de l'amplitude moyenne et de la balance (pic) de P2 (entre 100 et 300ms), N2 (entre 250 et 450ms) et P3 (entre 400 et 1000ms) (ERPs) en F1, F2, Fz, Fc1, Fc2, Fc4, C1, C2, Cz en condition Go versus NoGo	- Subtests Vocabulaire et Block Design (VPPS-III) - Go-NoGo task (en EEG)	- Effet Grip x Entraînement (meilleur pourcentage de réponse correcte pour le grp M que le groupe A à la tâche Go-NoGo suite à l'entraînement) - Effet du temps sur les temps de réponses (réduction des temps de réponse pour les deux groupes de manière indifférenciée) - Aucune différence pour N2 et P3. - Augmentation des pics d'amplitude de P2 après entraînement uniquement pour le grp M - Corrélation positive significative ($r=.5$) entre le changement d'amplitude du pic de P2 et le changement du score d'intelligence verbale (uniquement pour le groupe M) - Augmentation du score d'intelligence verbale pour le groupe M
--	---	--	--	--	--

Stratégique

N = 141 enfants (3 - 5 ans)	Randomisation : Oui Groupe contrôle : Oui (2 groupes un actif et un passif)	Programme d'entraînement PCMC-A combinant intervention auprès des parents/tuteurs/encadrants et entraînement de l'attention chez les enfants. Ce programme vise à soutenir le développement du contrôle cognitif chez les enfants d'âge préscolaire issus de milieux défavorisés. Les parents sont sensibilisés en groupe (1 session hebdomadaire de 2h pendant 8 semaines) sur des aspects tels que le langage, le stress, la discipline, la responsabilité ... et leurs impacts sur expérimental (4 sessions de 40 min par semaines pendant 8 semaines, soit 21h d'entraînement) mais cible sur l'école sans l'implication parentale	EEG (32 électrodes) Etude de l'amplitude d'un ERP moyenné au sein de la fenêtre 100-200ms en région antérieure (moyenne de F7/8, F9/4, F7/8, FC5/6), région centrale (T7/8, C5/6, CP5/6, C3/4) et postérieure (P7/8, P3/4, PO3/4, O1/2) au cours d'une tâche d'attention auditive en condition vigilance / inhibition	- Tâche d'attention sélective (Attention ou Inhibition de l'écoute d'une cible auditive lors de l'écoute simultanée d'une courte d'histoire) - Subtests raisonnement fluide, raisonnement quantitatif, Mémoire de travail (SB-5) - Subtests structure de phrase, concepts & sens (CELF-P-2) - Trois mesures d'évaluation des compétences d'alphabétisation et conscience phonologique (PIGD) - Delay task - Questionnaire Parents et enseignants (PKBS-2)	- Augmentation de l'ERP en zone postérieure lorsque l'enfant devait être vigilant, mais aucun changement lorsque l'enfant devait ignorer ce stimuli après entraînement uniquement pour grip contrôle - Effet Grip x Entraînement sur Amélioration du QI non verbal (Exp > Ctl) - Effet Grip x Entraînement sur Amélioration des compétences de langage réceptif (Exp > Ctl) - Effet Grip x Entraînement sur Amélioration des compétences pré-alphabétisation (Exp > Ctl) - Effet Grip x Entraînement sur Amélioration des compétences sociales (Exp > Ctl) - Effet Grip x Entraînement sur Réduction des problèmes de comportements (Exp > Ctl) - Effet Grip x Entraînement sur Amélioration de la relation parent-enfant (Exp > Ctl) - Effet Grip x Entraînement sur Réduction du stress (Exp > Ctl)
-----------------------------	--	--	--	--	--

Stratégique

écologique

N = 26 enfants (6 - 7,5 ans) (15 garçons)	Randomisation : Oui Groupe contrôle : Oui (actif)	Programme d'activité physique 2 sessions de 35 minutes par semaine pendant 8 semaines Soit "9heures d'entraînement Actif" : réalisation du programme à faible intensité	EEG (30 électrodes) Etude de l'amplitude et de la latence de P3 (ERP) déterminée selon le pic maximum observé au sein de la fenêtre 300-800ms en Fz, Cz et Pz en condition compatible versus incompatible	- Eriksen Flanker Test - Evaluation physique - Index de masse corporelle (IMC)	- Effet du temps sur l'IMC (réduction en post) - Effet grip x entraînement sur performances physiques (meilleures performances en post pour grip exp) - Effet du temps sur performance à la tâche de Flankers (Meilleures pourcentage de réponse correcte et temps de réponse après entraînement (faible et modéré) pour les essais les essais compatibles et incompatibles) - Effet du temps sur l'amplitude de la P3 en Fz plus grande après entraînement (faible et modéré) - Effet du temps sur la balance de la P3 réduite après entraînement (faible et modéré)
---	--	---	--	--	---

Dans les **approches basées sur les processus** on constate qu'un entraînement, (même limité en termes de durée ou d'intensité) peut engendrer une réduction de la latence de la N2 (Rueda et al., 2012; Rueda, Posner, et al., 2004), une augmentation de l'amplitude de la N2 (Q. Liu et al., 2015; Pietto et al., 2018; Rueda et al., 2012; Rueda, Posner, et al., 2004), amélioration de la connectivité fronto-pariétale, temporale inférieure et occipito-latérale (Astle et al., 2015). Les résultats obtenus tendent à plaider pour un effet neuronal de l'entraînement comparable aux effets de la maturation qui se maintiennent dans le temps. En effet, Rueda et collaborateurs (2004) montrent que 5 sessions d'ANT sur 2 à 3 semaines permettent d'observer un impact au niveau neuronal d'un entraînement informatisé ciblant l'attention exécutive. Dans cette étude, qui concerne des enfants de 5 ans, cette atteinte neuronale se concrétise par une réduction de la latence de la composante fronto-centrale N2, ainsi qu'une altération dans la topographie de sa survenue (plus postérieure suite à l'entraînement) dans le cas d'essais conflictuels chez le groupe expérimental par rapport au groupe contrôle. Des effets qui se maintiennent deux mois après l'intervention. Il semblerait que l'entraînement basé sur les processus permette d'accélérer le développement des réseaux cérébraux impliqués dans le contrôle cognitif. Il semblerait aussi que la plasticité neuronale se mette en place rapidement au cours du processus d'entraînement et demeure stable après l'arrêt de l'activité d'entraînement, mais que le substrat neuronal impacté par l'entraînement nécessite d'être renforcé au moyen de la répétition afin de permettre un gain d'efficacité et d'aboutir à des bénéfices au niveau des performances comportementales (Rabipour & Raz, 2012). En cas de bénéfice cognitifs, les changements neuronaux observés sont associés à des modifications des performances très circonscrites au processus et au contexte d'entraînement. Seules l'intelligence fluide (mesurée au moyen du K-Bit) ou la MDT semblent profiter d'effets de transfert pour cette approche d'entraînement (Astle et al., 2015; Rueda et al., 2012; Rueda, Posner, et al., 2004).

Pour les **entraînements stratégiques**, les résultats semblent indiquer également des bénéfices au niveau cérébral plaidant pour des changements allant dans le sens du développement (réduction de l'amplitude et/ou de la latence de la N2 (Espinete et al., 2013; Pozuelos, Combita, Abundis, Paz-Alonso,

et al., 2019), une activité plus mature en zone pariétale (Neville et al., 2013) ou cingulaire antérieure (Morton et al., 2009), augmentation de l'amplitude P2 (Espinete et al., 2013). Des changements qui, de plus, sont associés à des modifications des performances cognitives : réduction du taux d'erreur au DCCS (Espinete et al., 2013) Go-NoGo (Moreno et al., 2011), ou amélioration de l'autorégulation (Pozuelos, Combata, Abundis, Paz-Alonso, et al., 2019), de l'intelligence fluide (Neville et al., 2013; Pozuelos, Combata, Abundis, Paz-Alonso, et al., 2019) ou encore de la théorie de l'esprit (Neville et al., 2013). Par ailleurs, contrairement aux approches basées sur les processus (Rueda et al., 2012; Rueda, Posner, et al., 2004), les entraînements stratégiques semblent permettre un transfert à la fois étroit (bénéfice dans une tâche différente de celle entraînée mais reposant sur le(s) même(s) processus de traitement) et large (bénéfice obtenu sur des tâches des traitements plus éloigné(e)s) (Espinete et al., 2013; Lanoë et al., 2015, 2018; Neville et al., 2013; Pozuelos, Combata, Abundis, Paz-Alonso, et al., 2019). De plus, les changements observés au niveau cérébral sont associés à des changements cognitifs ou comportementaux (i.e., augmentation de l'amplitude de P2 corrélée significativement au changement du score d'intelligence verbale (Moreno et al., 2011)).

L'**intervention écologique** présentée dans ce tableau montre des bénéfices comportementaux au niveau de l'activité entraînée mais aussi au niveau des compétences de contrôle cognitif via la tâche de Flankers (Chang et al., 2013)). Par ailleurs, l'intervention impacte l'activité neuronale sous-jacente à la mobilisation du contrôle cognitif mesurée en EEG (augmentation de l'amplitude et réduction de latence de P3 en Fz (Chang et al., 2013)). Ces résultats tendent à mettre en évidence le fait que la mise en œuvre de l'autorégulation en contexte naturel et social serait à l'origine de bénéfices comportementaux et de modifications neuronales allant de pair avec un développement cognitif plus mature. En revanche pour ce qui est de l'activité physique le critère d'intensité ne génère pas de différence de bénéfice entre les groupes.

L'entraînement semble donc permettre à la fois d'accélérer le développement du contrôle cognitif mais aussi d'optimiser l'efficacité des traitements sous-jacents (meilleure performance comportementale). Les corrélats cérébraux attestent de modifications survenant précocement lors de la mise en place de l'entraînement et qui semblent perdurer après l'entraînement. Au niveau des performances comportementales, les approches non-spécifiques semblent les plus à même à produire des bénéfices généralisables. Une récente étude chez l'adulte vient appuyer ce constat (Simonet et al., 2019). Les auteurs ont comparé deux modalités d'entraînement informatisé du contrôle cognitif (entraînement simple via une tâche d'inhibition motrice de Go-NoGo et entraînement complexe via une tâche de Go-NoGo adaptée de sorte à impliquer MDT, flexibilité et suppression d'interférence en plus de l'inhibition motrice) à un groupe contrôle passif. Pour observer un transfert de bénéfice, il est nécessaire d'avoir un recouvrement entre les processus cognitifs et corrélats cérébraux impliqués à la fois dans la tâche entraînée et dans une autre tâche d'intérêt (Dahlin et al., 2008). C'est pourquoi les auteurs ont mesuré les performances obtenues lors de la réalisation de tâches neurocognitives partiellement ou intégralement similaires aux tâches d'entraînement (Go-NoGo, tâche de Flanker d'Eriksen, tâche d'alternance, tâche de Simon, TMT). Des mesures EEG relatives à la tâche entraînée (ERP frontal latéral gauche et frontal médial à 200/250ms après le stimulus) ont également été recueillies avant et après entraînement. Les données EEG mettent en évidence une modification liée à l'entraînement complexe : i) réduction de l'amplitude de l'ERP localisé dans une zone recouvrant le gyrus frontal supérieur, le gyrus frontal médian et le cingulaire antérieur lors des essais NoGo. En revanche les résultats issus de l'analyse des performances montrent que seul le groupe ayant réalisé l'entraînement simple a manifesté un gain d'efficacité après entraînement à la tâche de Go-NoGo. Par ailleurs aucun effet de transfert générant une amélioration sur d'autres tâches que le Go-NoGo en posttest n'est reporté (simple effet test-retest sur les tâches d'Eriksen et d'alternance). Cette étude montre donc que les entraînements basés sur les processus soient en mesure de modifier le traitement cérébral lié à la mise en œuvre des différents processus du contrôle cognitif sollicité dans la tâche. Cependant, ces modifications reflètent des bénéfices ultra-spécifiques à la tâche entraînée et

ne permettent pas de transfert sur des tâches proches ou sur des comportements sollicitant les mêmes processus. Autrement dit il semblerait que pour maximiser les effets de transfert, l'entraînement ne doivent non pas entraîner un (des) processus, mais plutôt soutenir l'intégration de ce(s) processus dans le la mise en place du contrôle cognitif de l'enfant. Pour cela, les situations mettant en jeu l'autorégulation se positionnent alors comme un cadre idéal (contrairement aux approches plus « *bottom-up* », qui entraîne le processus). L'approche stratégique, qui sollicite également les processus métacognitifs, semble particulièrement cohérente par rapport à cette interprétation. En effet, les traitements impliqués dans le contrôle cognitif et la métacognition sont étroitement liés, notamment au travers du mécanisme de supervision (Koriat et al., 2006; Shimamura, 2000). L'approche écologique présente également un certain intérêt. Elle offre un cadre d'expérimentation de ces processus permettant de les exercer de manière intégrée au travers plusieurs domaines. Les deux approches ont l'avantage de permettre un transfert de bénéfices soit au travers de stratégies pouvant être appliquée de façon transversale, soit au travers de connaissances et de compétences globales acquises via l'expérience.

Les précédentes études nous montrent que le contrôle cognitif peut-être entraîné. Son entraînement est susceptible de générer des bénéfices à plusieurs échelles : à l'échelle neuronale, cognitive et comportementale. Cependant la majorité des connaissances actuelles proviennent d'entraînements basés sur les processus, qui, bien qu'efficaces, ne favorisent pas une généralisation des bénéfices. Le modèle de Klingberg (2016) soutient l'hypothèse selon laquelle par le biais de l'entraînement on favorise le processus de spécialisation interactive qui lui-même accélère la maturation des réseaux concernés. Ce modèle, construit principalement d'après les approches basées sur les processus, s'applique-t-il aux approches stratégiques et écologiques ? Le modèle de Jolles & Crone (2012) nous indique que les bénéfices d'un entraînement proviennent d'une accélération des processus de maturation et/ou d'une amélioration du fonctionnement des processus de traitement. Le modèle annonce que, dans le cas des entraînements basés sur les processus, la répétition soutenue stimulerait la maturation neuronale sous-

jacente à un traitement cognitif, ceci pouvant résulter en des bénéfices cognitifs qui s'avèrent très focalisés. Qu'en serait-il des bénéfices dans les entraînements stratégiques et écologiques qui ne reposent pas sur une sollicitation intense des processus ? Les effets neuronaux de l'entraînement seraient-ils similaires ? Et quand bien même les corrélats neuronaux des effets du traitement seraient similaires, reflèteraient-ils pour autant les mêmes mécanismes ? Peut-on différencier ces différents types de bénéfices ? Par ailleurs cela soulève également la question du dosage de l'entraînement en fonction de l'approche choisie.

Pour les approches écologiques on constate au manque cruel de connaissances quant aux mécanismes en jeu dans les changements consécutifs à leur mise en place. Il apparaît crucial de comprendre quel(s) processus de traitement est/sont reflété(s) par ces bénéfices et par quel(s) mécanisme(s) neuronal(aux) est/sont-il(s) supporté(s) ? L'intérêt majeur de l'observation de ces effets au cours de la période préscolaire est que les processus de traitement relatifs à l'implémentation du contrôle cognitif sont encore immatures. Les études développementales nous renseignent sur les changements dus à l'âge, effets qui coïncident avec les effets obtenus lors des entraînements basés sur les processus. En réalisant un entraînement appartenant à une approche écologique et/ou stratégique, il serait alors possible de comparer la nature des effets observés en parallèle de l'efficacité des processus de traitement afin de mieux apprécier la nature concrète de ces effets.

POINTS CLÉS

- ☞ Il y a différentes approches dans l'entraînement ; i) basés sur les processus, une approche mécanistique qui cible des traitements spécifiques au moyen de la répétition de tâche ; ii) stratégiques, reposant sur des processus métacognitifs visant à apprendre à réguler volontairement son comportement ; iii) écologiques, reposant sur l'apprentissage, la mise en œuvre de fonctions ciblées au travers d'une activité non-spécifique mobilisant également d'autres fonctions
- ☞ L'efficacité des entraînements reposent sur des critères d'intensité (effort investis dans la tâche), de fréquence, de durée et d'adaptation au niveau de la personne entraînée
- ☞ L'entraînement peut générer des modifications au niveau neuronal (structure et fonctionnement du cerveau), au niveau du fonctionnement cognitif ainsi qu'au niveau de la performance comportementale
- ☞ Les bénéfices d'un entraînement peuvent être directes (sur la tâche entraînée), ou se transférer sur d'autres traitements proches ou plus éloignés. Cela va dépendre du chevauchement des processus communément impliqués dans la tâche entraînée et l'autre tâche/comportement.
- ☞ Le jeu de faire semblant est une activité simple ludique et naturelle qui sollicite les fonctions exécutives dans l'ensemble des sphères dans lesquelles le contrôle cognitif intervient (cognitive, sociale et émotionnelle)
- ☞ La majorité des connaissances actuelles sont issus d'approches basées sur les processus mais on ne sait pas sur quel(s) mécanisme(s) repose(nt) le transfert ou la généralisation des bénéfices obtenus dans les approches stratégiques et écologiques

D. AXES DE RECHERCHE

La recherche montre que la période préscolaire est une fenêtre particulière de développement du contrôle cognitif, au cours de laquelle ce contrôle présente une plus grande efficacité. Ce développement est le fruit de l'interaction entre la maturation des réseaux cérébraux impliqués dans le contrôle cognitif et la richesse de l'environnement qui fournit à l'enfant des opportunités pour expérimenter et exercer ce contrôle. Sur ce point, il a été montré que les enfants issus de milieux défavorisés ont un contrôle cognitif moins efficace, en partie lié à des phénomènes de privation, de stress ou de pratiques parentales inadaptées (Hackman et al., 2010; Johnson et al., 2016; Noble et al., 2005). Ces facteurs impactent directement les corrélats cérébraux impliqués dans le développement cognitif, principalement le cortex préfrontal (McDermott et al., 2012; Piccolo, Merz, He, Sowell, & Noble, 2016; Sheridan & McLaughlin, 2016) et les effets de ces facteurs sur le contrôle cognitif expliquent en partie les effets du SES sur la maturité scolaire des enfants mais aussi leur réussite scolaire ultérieure (Hackman et al., 2010; Lawson & Farah, 2017; Moffitt et al., 2011). La figure 12 montre la relation entre les différents facteurs associés au SES et les conséquences sur le plan neurocognitif. Les auteurs précisent que pour briser cette spirale descendante liée au SES, il est possible d'intervenir afin de modérer l'influence de ces facteurs (i.e. mauvaises pratiques parentales, faible stimulation cognitive, ...) sur le développement cognitif de l'enfant.

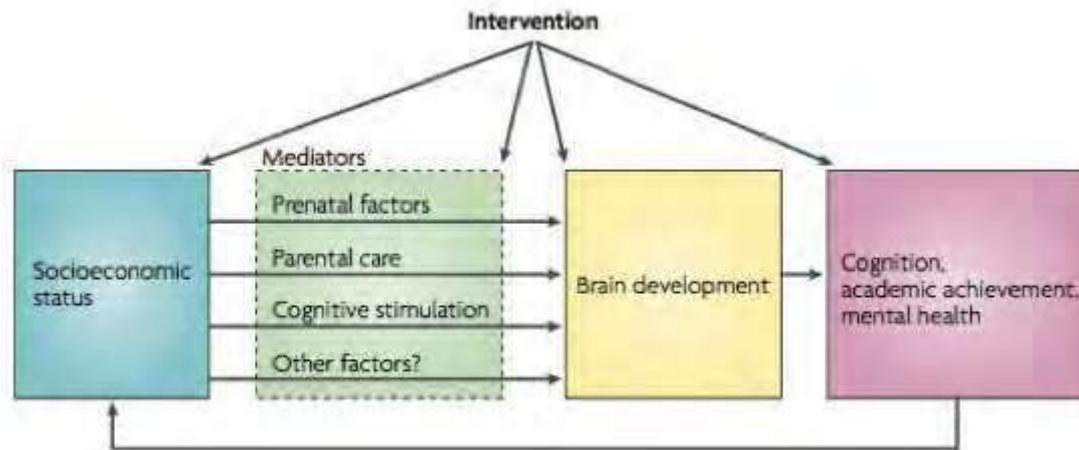


Figure 12. Schéma illustrant l'impact du Statut Economique et Social (SES) sur la cognition, la réussite scolaire et la santé mentale (D'après Hackman, Farah & Meaney, 2010)

De nombreuses études rapportent que via la stimulation ou l'entraînement du contrôle cognitif il est possible de générer des modifications structurelles et fonctionnelles au niveau cérébral. Des bénéfices interprétés comme permettant d'accélérer le processus de maturation ou bien de compenser des retards de développement (Anderson et al., 2013; Karmiloff-Smith, 2009). Cependant les mécanismes cérébraux régissant les bénéfices obtenus lors d'entraînements du contrôle cognitif sont encore mal connus. De plus, la majorité de ces connaissances sont issues d'approches basées sur les processus (Bryck & Fisher, 2012; Karbach & Schubert, 2013; Klingberg, 2016), or ces entraînements ne semblent pas permettre de généraliser les bénéfices obtenus (contexte sociale ou académique). D'autres approches, comme l'approche écologique ou stratégiques, se révèlent intéressante pour induire d'importants bénéfices au niveau du contrôle cognitif (Traverso et al., 2015), qui peuvent aussi se généraliser au niveau comportemental en produisant notamment des bénéfices au niveau des performances académiques (W. S. Barnett et al., 2008; Blair & Raver, 2014; Adele Diamond et al., 2007; Moreno et al., 2011). Or, les mécanismes cérébraux qui sous-tendent les effets proches et de transfert de ces entraînements n'ont jamais été explorés. On ne connaît donc rien de l'impact de ces entraînements sur le développement du substrat cérébral impliqué dans le contrôle cognitif.

Cette thèse a pour enjeu d'appréhender les modifications de l'activité neuronale reflétant l'implémentation du contrôle cognitif. Des modifications consécutives d'une part au développement ; et d'autre part, à la mise en œuvre d'un entraînement écologique basé sur le jeu de faire semblant réalisé en contexte social.

Ce travail repose sur deux hypothèses. La première hypothèse est qu'un entraînement écologique réalisé sur des enfants d'âge préscolaire génère des bénéfices en termes d'autorégulation, c'est-à-dire, une meilleure implémentation du contrôle cognitif au service de l'adaptation comportementale (impliquant les sphères cognitive, sociale et émotionnelle) qui repose sur des compétences et des processus de traitement plus efficaces. La seconde hypothèse est que dans le cas où il y aurait des bénéfices, on s'attend à ce que ces derniers s'apparentent à des effets développementaux classiques, au niveau des performances cognitives ou de l'activité neuronale. Ceci permettrait de montrer que l'entraînement écologique basé sur le jeu de faire semblant permet 'd'accélérer' le développement du réseau cérébral impliqué dans le contrôle cognitif.

L'originalité de notre approche a consisté à évaluer les effets du développement classique et les effets de l'entraînement sur des mesures cognitives, et cérébrales du contrôle cognitif et de comparer ces effets entre eux afin de caractériser les mécanismes cérébraux de l'entraînement, et en particulier ces effets sur le développement du réseau cérébral impliqué dans ce contrôle. Pour cela nous avons mis en place deux paradigmes expérimentaux.

(1) Une première étude transversale sur un échantillon d'enfant (N=116) d'âge allant de 4 à 8 ans afin d'observer les changements intervenant au niveau des performances et de l'activité neuronale associés au développement classique du contrôle cognitif et en particulier à la gestion de l'interférence. Plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés aux oscillations thêta. L'activité neuro-oscillatoire MFT est impliquée dans les traitements liés au contrôle cognitif, notamment lors de la gestion d'interférence (i.e. inhibition de réponse, supervision, maintien actif). Nous émettons l'hypothèse que l'activité neuro-

oscillatoire MFT reflète l'efficacité des processus impliqués dans la gestion d'interférence, des processus encore immatures lors de la période préscolaire (Braver & West, 2008; Cao et al., 2013; Cepeda et al., 2001; Davidson et al., 2006). Par conséquent nous postulons que l'activité neuro-oscillatoire MFT soit un marqueur neuronal du développement de l'efficacité du contrôle.

(2) Une seconde étude sur un échantillon d'enfant (N=73) âgés de 4 à 6 ans, évalués avant et après une intervention écologique ciblant le contrôle cognitif afin d'observer les effets liés à la réalisation d'un l'entraînement répondant aux critères d'évaluation des protocoles à essais contrôlés randomisés (ECR). Il est question ici de l'intérêt d'un d'entraînement basé sur le jeu de faire semblant sur le contrôle cognitif et l'autorégulation de l'enfant mais aussi d'évaluer si cette approche permet de bénéficier à d'autres compétences, socioaffectives et à certains apprentissages académiques. Dans cette deuxième étude, nous avons aussi cherché à caractériser les mécanismes cérébraux de cet entraînement en évaluant ces effets sur un marqueur cérébral du contrôle cognitif, les oscillations thêta. Nous émettons l'hypothèse que l'entraînement génère des bénéfices à l'échelle comportementale, cognitive et neuronale. Ces améliorations comportementales seraient le reflet d'une meilleure efficacité du contrôle cognitif au travers de la sollicitation des processus impliqués à la fois dans la gestion d'interférence et l'autorégulation. Des processus qui sont encore immatures lors de la période préscolaire. De plus, nous postulons que cette meilleure efficacité cognitive repose sur un mécanisme cérébral plus mature. C'est-à-dire que l'entraînement favorise son développement par le biais d'une accélération du processus de maturation. Aucune étude ne s'est intéressée à l'impact d'entraînement du contrôle cognitif sur cette activité oscillatoire MFT. Ces bénéfices seront interprétés au regard des résultats obtenus lors de la première étude afin d'établir si les éventuels bénéfices de cet entraînement seraient cohérents avec des effets du développement tant au niveau neuronal que cognitif.

III. PARTIE EXPÉRIMENTALE

A. PRÉAMBULE MÉTHODOLOGIQUE

1. Participants

Pour mener à bien ces deux études, nous avons, dans un premier temps, réalisé une étude pilote sur un échantillon réduit de 14 enfants dans une première école maternelle. Cette première étape nous a permis d'éprouver les procédures d'évaluation et d'entraînement, ainsi que d'ajuster le matériel. Nous avons ensuite constitué un échantillon de 116 enfants répartis au sein de trois écoles (deux autres écoles maternelles et une école élémentaire). La figure 13 précise la démarche expérimentale utilisée. La première étude, l'étude transversale représentée par un cadre orange, a mobilisé des enfants d'âges préscolaire et scolaire. Les mesures ont été récoltées à un seul temps d'évaluation. La seconde étude (cadre bleu), l'étude microgénétique, ne concernait quant à elle que les enfants d'âge préscolaire. Ces derniers ont été évalués à deux reprises : le temps 1, mesure initiale (pré-intervention) ; et le temps 2, mesure survenant 6 mois après la première (post-intervention) sur le même échantillon d'enfant (ayant subi une légère attrition) et faisant suite à une période d'intervention.

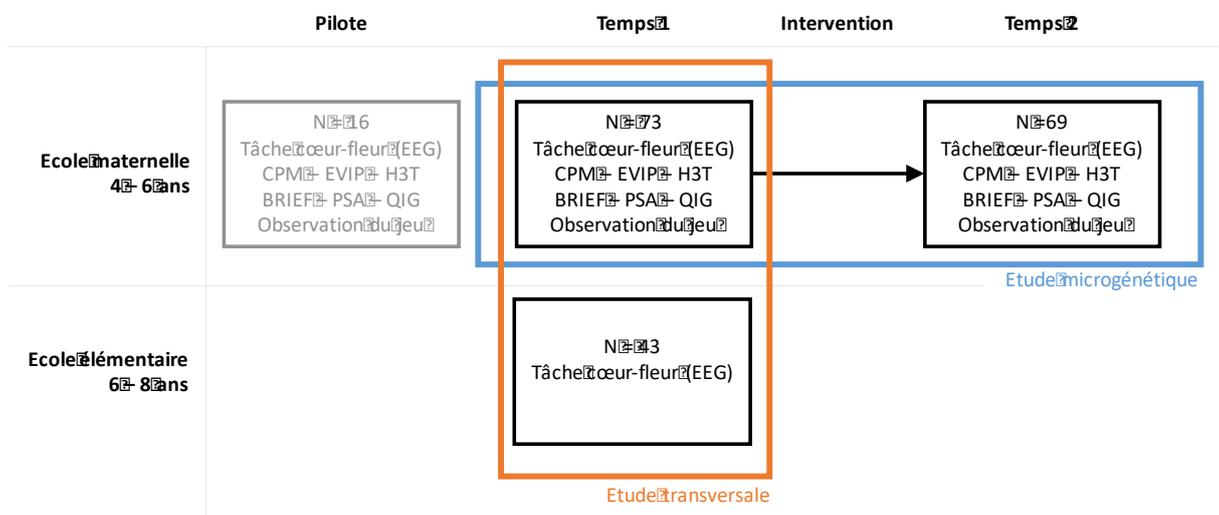


Figure 13. Protocole expérimental illustrant la composition et le mode d'évaluation de nos participants lors des deux études

2. Mesures

Au cours de ce travail, nous avons mesuré les performances du contrôle cognitif de chacun des enfants au moyen de la tâche cœur-fleur, tâche centrale de ce travail de thèse, utilisée en tant que paradigme d'interférence. Cette tâche a permis de comparer les performances entre enfants d'âge scolaire et préscolaire au sein de l'étude transversale. Par ailleurs, des mesures additionnelles ont été réalisées dans le cadre du protocole d'intervention afin 1) de contrôler les paramètres d'influence, 2) permettre d'élargir le champ d'impact éventuel de l'entraînement. La procédure d'évaluation est présentée dans la figure 13 et nous présentons ci-dessous un descriptif de chacune des tâches utilisées.

› **Compétences cognitives**

❖ **Tâche Cœur-Fleur (HF) (Diamond et al., 2007)**



60min



La tâche informatisée évalue l'efficacité du contrôle cognitif de l'enfant lors de la gestion de différents types d'interférence impliquant principalement les compétences d'inhibition et de flexibilité. L'enfant reçoit pour consigne de presser sur la touche située latéralement : 1) du même côté que le stimulus lorsque ce dernier est un cœur, 2) du côté opposé au stimulus lorsque celui-ci est une fleur. Les essais cœur et fleurs sont alternées de manière randomisée. La tâche est adaptée à l'évaluation d'enfants à partir de 4 ans avec un temps de réponse par essai de 2500ms (1500ms pour les enfants de plus de 6 ans).

❖ **Coloured Progressive Matrices (CPM) (Raven, 1983)**



15min



La tâche est proposée à l'enfant par un expérimentateur entraîné. Il n'y a pas de limite de temps. Le CPM comprend 36 items répartis en trois ensembles de 12 (ensemble A, Ab et B). Dans chaque ensemble, les matrices (qui sont de couleur vive pour attirer et maintenir l'attention des enfants) sont classées en fonction de la difficulté croissante. Les ensembles varient également en difficulté, l'ensemble B contenant les éléments les plus difficiles. Les ensembles ont été conçus pour distinguer les degrés de maturité intellectuelle en quantifiant la capacité d'un enfant à faire des comparaisons et à raisonner par analogie.

La tâche est adaptée à l'évaluation des enfants âgés de 5 ans ½ à 11 ans.

❖ **Echelle de Vocabulaire en Images Peabody (EVIP) (Dunn & Dunn, 1997)**



15min



La tâche est proposée à l'enfant par un expérimentateur entraîné. Il n'y a pas de limite de temps. L'expérimentateur évalue la connaissance lexicale de l'enfant ainsi que sa compréhension orale en énonçant des mots (i.e. Poupée, Tranquillité, Cérémonie). L'enfant répond en désignant une des quatre images présentées devant lui. L'EVIP comprend 170 items présentés avec un ordre de difficulté croissant. L'âge de l'enfant est pris en compte pour déterminer l'item de début (plancher). Le test prend fin lorsque l'enfant réalise une série de 6 erreurs. Un score prenant en compte l'item planché, l'item plafond et le nombre d'erreur réalisé est calculé.

La tâche est adaptée à l'évaluation des enfants âgés de 2 ans ½ à 18 ans.

- ❖ **Head to Toes Task (H3T)** (Cameron Ponitz et al., 2008; McClelland et al., 2007)



1min



Le test évalue l'autorégulation comportementale chez le jeune enfant. Après avoir vérifié la compréhension des consignes chez l'enfant (e.g. « Si je te dis -pieds- tu dois toucher ta tête, et si je te dis -tête- tu dois toucher tes pieds »), l'expérimentateur énonce une série de 20 commandes. A chaque essai l'expérimentateur évalue la réponse motrice de l'enfant et attribue un score de 0 (échec) 1 (réussite après correction) ou 2 (réussite). Un score allant de 0 à 40 est finalement obtenu par l'enfant.

Le test est adapté à l'évaluation des enfants âgés de 4 ans à 8 ans.

- ❖ **Inventaire d'évaluation comportementale des fonctions exécutives (BRIEF)** (Gioia et al., 2010; Roy et al., 2013)



15min



La BRIEF est un questionnaire à destination des parents ou proches de l'enfant demandant de répondre à des énoncés relatifs à la fréquence d'observations de comportements chez l'enfant au moyen d'une échelle à 3 points (Jamais – Parfois – Souvent). Il compte 86 énoncés regroupées en 8 échelles : Inhibition, Flexibilité, Contrôle émotionnel, Initiation, Organisation matérielle, Mémoire de travail, Planification/Organisation, Contrôle. Ces échelles permettent au praticien, par l'analyse du profil, de repérer des dysfonctionnements exécutifs ayant un impact dans la vie quotidienne. Les trois premières échelles permettent également de calculer un indice de régulation comportementale (IRC). Les cinq échelles restantes constituent l'indice de métacognition (IMC). Enfin, un score composite exécutif global (CEG) vient compléter les indices comportementaux pouvant être utiles au psychologue

Le questionnaire est adapté à l'évaluation des enfants âgés de 5 an à 18 ans.

› **Compétences socio-émotionnelles**

❖ Profil Socio Affectif* (PSA) (Dumas et al., 1997)



15min



Ce questionnaire à destination des parents/éducateurs renseigne sur les compétences sociales et d'éventuelles difficultés d'adaptation des enfants. Il permet d'obtenir différents scores (Compétence sociale de l'enfant ; Problèmes intériorisés ; Problèmes extériorisés ; Adaptation générale) et sous-scores (Déprimé/Joyeux ; Anxieux /Confiant ; Irritable/Tolérant ; Isolé/Intégré ; Agressif/Contrôlé ; Egoïste/Prosocial ; Résistant/Coopératif ; Dépendant/Autonome).

Le questionnaire est adapté à l'évaluation des enfants âgés de 2 ans ½ à 6 ans.

› **Autres mesures**

❖ Evaluation de la maturité du jeu de faire semblant (Leong & Bodrova, 2012)



30min



L'évaluation de la maturité du jeu de faire semblant a été réalisée au moyen d'une grille de cotation développée par Leong & Bodrova (2012). Cette grille demande à l'expérimentateur d'observer une séance de jeu au cours de laquelle l'enfant joue librement. Cinq aspects sont étudiés : le rôle, le plan, le scénario, le langage et les accessoires. A chacune de ces dimensions du jeu de faire semblant, l'expérimentateur peut attribuer un score de 1 à 5 (plus le score est élevé plus il correspond à l'observation d'évènements reflétant un jeu mature).

❖ Questionnaire d'informations générales (QIG)



10min



Le QSD est un questionnaire visant à recueillir des informations sur le contexte socio-économique des participants au programme. Les questions à destination des parents renseignant sur leur niveau d'éducation, leur profession, et des informations sur l'enfant évalué (composition de la fratrie, la consommation d'écran, ...).

❖ Test de latéralité (De Agostini & Dellatolas, 1988)



10min

Le test évalue la manualité droite/ gauche / ambidextre à travers huit propositions d'action du quotidien. On interroge l'enfant, l'expérimentateur est invité à faire mimer les actions par les enfants (i.e. se laver les dents). Un score de 1 (gauche) 2 (les deux) ou 3 (droite) est attribué pour chaque proposition.

a) Mesures EEG

Les mesures EEG ont été récoltées lors de la réalisation de la tâche cœur-fleur sur l'ensemble des enfants d'âge scolaire et sur un sous-échantillon de 50 enfants d'âge préscolaire. Les données ont dans un premier temps subi un prétraitement (filtre passe-haut (*High-pass filter* 1Hz), suppression des artéfacts électriques (*notch filter* 50 Hz), Identification et suppression manuelle des essais bruités, Identification et suppression des éventuelles électrodes défaillantes), ensuite une analyse par composante indépendante (ICA soit *Independent Component Analysis* en anglais) a été réalisée. L'ICA est une méthode de traitement du signal permettant de séparer les sources indépendantes mélangées linéairement et enregistrées depuis plusieurs capteurs. Elle consiste à décorréler le signal provenant d'un ensemble de source afin d'extraire les artéfacts intégrés dans les données (car ils sont généralement indépendants les uns des autres). Son but est d'extraire les sources non informatives telles que les mouvements oculaires et contractions musculaires qui affectent grandement la qualité des données. Une fois le signal nettoyé, on le décompose en temps-fréquence. Pour cela,

La décomposition temps-fréquence a été réalisée au moyen d'ondelettes complexes de Morlet :

$$e^{i2\pi ft} e^{-t^2/(2\sigma^2)},$$

où t est le temps, f est la fréquence, de 2 à 40 Hz séparée en 40 pas espacés logarithmiquement, et σ définit la largeur de chaque ensemble de bandes de fréquences selon $n / (2\pi f)$, où n est un nombre de cycles d'ondelettes variant de 3 à 6 par pas. À partir du signal complexe résultant, une estimation de la puissance spécifique à la bande de fréquence à chaque temps a été définie comme le carré de l'amplitude du résultat de la convolution :

$$Z = (\text{real}[z(t)]^2 + \text{imag}[z(t)]^2)$$

Les valeurs de puissance d'un essai ont ensuite été moyennées pour chaque condition séparément, puis normalisées par rapport à la période de référence

moyenne de la condition (-400 à -100 ms) en utilisant un décibel (dB) transformé à chaque fréquence :

$$dB \text{ power} = 10 \times \log_{10}[\text{power}/\text{baseline}]$$

Pour chaque participant, nous avons identifié une seule composante MFT en procédant aux étapes suivantes. Tout d'abord, les données d'essai ont été filtrées dans la bande thêta à l'aide d'un filtre gaussien à bande étroite (pic à 6 Hz et largeur à mi-hauteur du maximum du pic de 3 Hz (FWHM = 3 Hz, pour *Full width at half maximum*)). Deuxièmement, pour chaque sujet, des données d'essai unique filtrés temporellement ont été utilisés pour calculer la matrice de covariance S (matrice « signal ») et des données non filtrées à large bande ont été utilisées pour calculer la matrice de covariance R (matrice « de référence »). Troisièmement, une décomposition généralisée en valeur propre (eigenvalue⁶) a été effectuée sur les matrices de covariance S et R (fonction MATLAB eig) pour obtenir un ensemble de vecteurs ou filtres spatiaux (W), qui séparent au maximum la matrice S de la matrice R :

$$SW = RWA$$

où W est la matrice des vecteurs propres et Λ est une matrice diagonale des valeurs propres.

Les 6 premiers vecteurs (filtres spatiaux) associés aux valeurs propres les plus élevées (éléments diagonaux dans la matrice Λ) ont été appliquées à des données non filtrées, ce qui a donné lieu à l'identification de 6 composantes thêta. La représentation topographique des filtres spatiaux (modèles d'activation (Haufe et al., 2014) et la représentation temps-fréquence des

⁶ Les valeurs propres (*eigenvalues*) et les vecteurs propres (*eigenvectors*) permettent d'obtenir un taux de variation et de maintenir des relations entre deux variables dans des équations différentielles linéaires. Ils permettent en quelque sorte de réduire la taille d'une matrice tout en gardant l'information associée à ses précédentes dimensions.

composantes de la moyenne des essais ont été inspectées visuellement et une seule composante a été identifiée par sujet. La procédure de sélection s'appuie sur de précédents travaux ayant appliqués cette méthode (Gulbinaite et al., 2017; Töllner et al., 2017). La figure 14 illustre les six premières composantes isolées pour un sujet. Les représentations topographiques et fréquentielles conduisent à sélectionner la composante RESS 1 comme celle qui reflète le mieux le traitement du contrôle cognitif relatif à la réalisation de la tâche HF chez ce sujet.

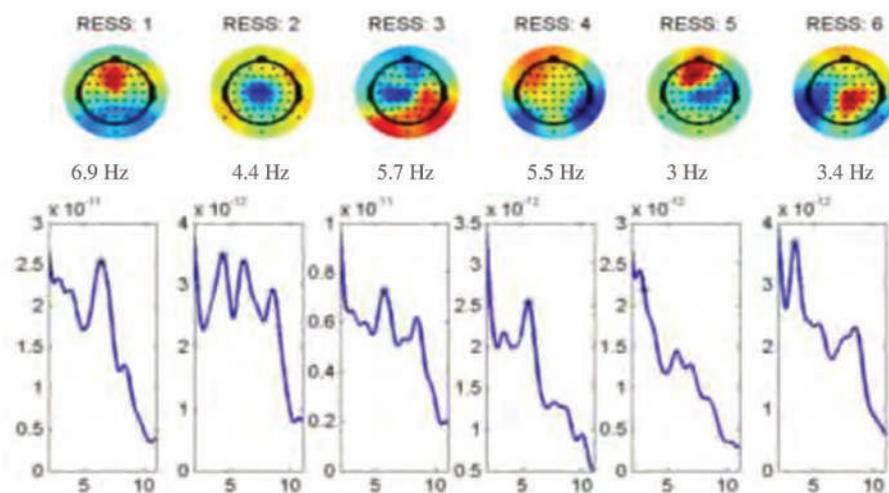


Figure 14. Illustration de six composantes θ identifiées par l'application de filtres spatiaux sur les données électroencéphalographique d'un sujet aléatoire

Nous avons ensuite identifié un pic de puissance θ individuel dans la fenêtre 200 ms à 1500 ms (toutes condition moyennées), puis une plus petite fenêtre, spécifique au sujet, a été déterminée autour du pic d'amplitude : en fréquence (± 1 Hz) et en latence (± 150 ms). Une mesure de l'amplitude centrée et standardisée a été extraite par essai afin de conduire des analyses sur essais uniques (*single-trial analyses*). Par ailleurs, la puissance θ dans cette fenêtre spécifique a été moyennée pour chaque condition afin de calculer la puissance θ frontale individuelle moyenne (MFT pour *Mid frontal Theta*). La figure 15 illustre la procédure d'identification de la fenêtre spécifique sur un seul sujet pris aléatoirement.

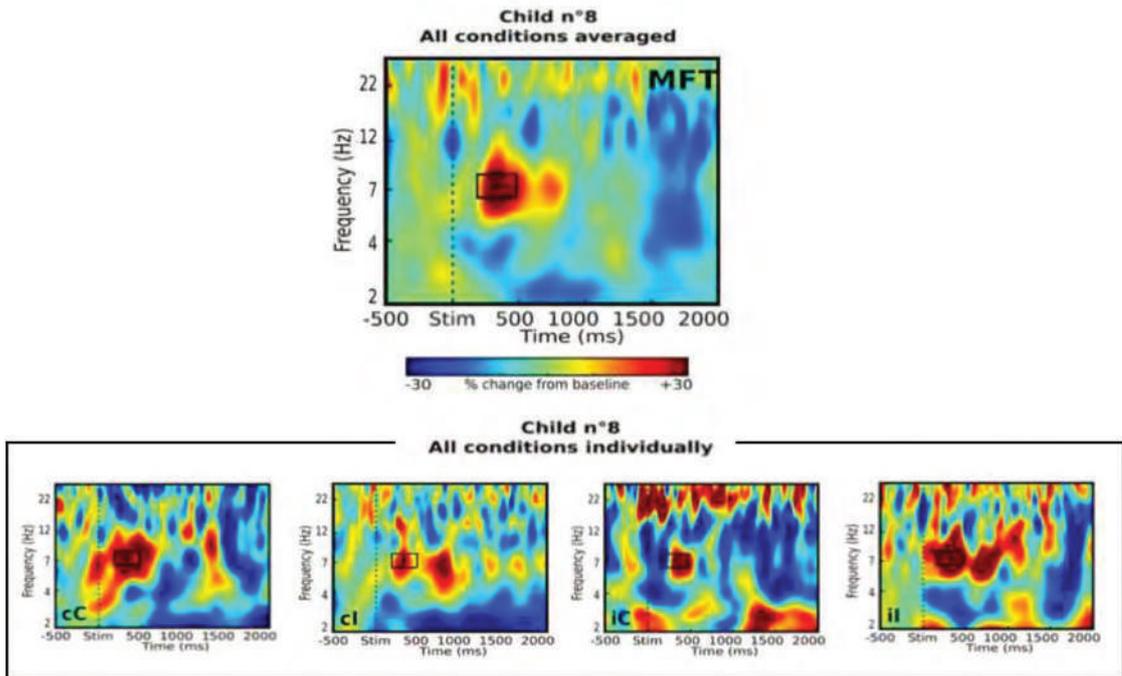


Figure 15. En haut : représentation temps-fréquence de l'amplitude de la composante MFT (corrigée par rapport à la baseline) pour les données moyennées sur les conditions d'interférence d'un sujet sélectionné au hasard. L'étoile noire montre le pic d'amplitude dans la bande de fréquence thêta pour la fenêtre 200 à 1500ms. Le rectangle noir montre la fenêtre étendue qui correspond au pic ± 1 Hz et ± 150 ms. En bas : la fenêtre précédemment déterminée est utilisée pour extraire la mesure de la MFT spécifique à la condition. L'activité dans la fenêtre est moyennée pour obtenir une mesure unique de l'amplitude de puissance MFT par condition pour ce sujet spécifique.

B. ETUDE TRANSVERSALE

1. Introduction

Le contrôle cognitif est mobilisé lors de la gestion d'interférence. Or, en fonction de la nature de l'interférence les fonctions du contrôle cognitif mobilisées sont différentes (Kornblum et al., 1990). Comme il a été présenté plus tôt dans ce travail, on peut établir une "hiérarchie" dans l'interférence (Kornblum & Lee, 1995). L'intérêt de cette étude est de comparer l'amplitude de l'oscillation thêta sous-jacente à l'opérationnalisation du contrôle cognitif au travers de différentes interférences générant des conflits plus ou moins élevés. La littérature existante a d'ores et déjà mise en lumière le fait que les interférences liées à de la reconfiguration, impliquant de la flexibilité, génèrent des conflits plus importants que les interférences liées à la prépotence d'une réponse par rapport à une réponse alternative, impliquant quant à elle de l'inhibition (Crone, Bunge, et al., 2006; Davidson et al., 2006). Ces conflits sont généralement mesurés au moyen d'indicateurs de performances comme les temps de réponse ou le pourcentage de réponse correcte. Ces indicateurs ont ainsi révélé qu'en fonction de la nature de la fonction du contrôle cognitif mobilisé, le conflit serait plus ou moins fort. Les études développementales montrent que ces différences évoluent en fonction de l'âge (Davidson et al., 2006). Autrement dit, les patterns développementaux de la gestion de l'interférence sont différents en fonction de la nature même de l'interférence en question.

L'augmentation de l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire dans la bande de fréquences thêta [4 à 8 Hz] dans les zones fronto-centrales dans différentes situations de conflit nécessitant l'implémentation du contrôle cognitif (effets Simon, Flanker, Stroop, Go-NoGo), suggère que ce rythme soit en charge d'orchestrer les processus cognitifs dans les circuits neuronaux soutenant l'engagement du contrôle cognitif chez l'adulte (Cohen, 2014; Cohen & Cavanagh, 2011; Jensen & Tesche, 2002; Nigbur, Ivanova, & Stürmer, 2011b; Richardson, Anderson, Reid, & Fox, 2018; Sheridan, Kharitonova, Martin, Chatterjee, & Gabrieli, 2014). Chez l'enfant, des études en EEG sur des tâches mobilisant le contrôle cognitif (i.e. tâche de suivi de regard, tâche A-non-B,

tâche d'imitation) ont montré une implication de l'activité neuro-oscillatoire thêta dès l'âge de 5 mois (Bosseler et al., 2013; Meyer et al., 2019; Morasch & Bell, 2011; Orekhova et al., 1999). Cependant ces études ne nous permettent pas d'appréhender les processus cognitifs soutenus par le rythme thêta. En outre, chez les jeunes enfants, les FEs mobilisées lors de ces tâches ne sont pas clairement identifiables (Huizinga et al., 2006; Lehto et al., 2003). Les réseaux sous-jacents à l'implémentation du contrôle cognitif sont encore immatures et c'est au travers d'une structure à un facteur (à l'âge préscolaire) ou plusieurs facteurs (à partir de l'âge scolaire) que le contrôle cognitif s'illustre.

Dans cette étude, nous nous intéresserons à caractériser le rôle de l'activité neuro-oscillatoire thêta au travers de l'opérationnalisation du contrôle dans différents contextes d'interférence et dans différentes tranches d'âge reconnues pour manifester une structure différente du contrôle cognitif. Nous testerons l'hypothèse selon laquelle le rythme thêta chez l'enfant supporte l'implémentation du contrôle cognitif au travers du processus de différenciation des FEs. Le rythme thêta agirait donc comme mécanisme général de l'implémentation du contrôle cognitif dès la petite enfance.

2. Matériel & Méthodes

Un échantillon de 116 enfants a été recruté au sein de trois écoles françaises (2 maternelles et une primaire). Les enfants ont été évalués avec la tâche cœur-fleur. La complexité de la tâche a été adaptée en fonction de l'âge en réduisant le temps imparti pour donner la réponse chez les plus grands (2500ms pour les enfants d'âge préscolaire versus 1500ms pour les enfants d'âge scolaire). Le paradigme expérimental mobilisait le contrôle d'interférence au travers de conditions nécessitant un niveau de conflit variable. Les temps de réponse des essais corrects ainsi que le pourcentage de réponse correcte ont été étudiés pour ce qui est des données comportementales. Les mesures EEG ont été recueillies lors de la réalisation de la tâche. Ces dernières ont été analysées en deux temps. D'abord à l'échelle de l'électrode, une analyse par permutation a été réalisée pour comparer l'amplitude de l'activité oscillatoire thêta au cours de la tâche versus pendant la *baseline* (de -400 à -100ms). Cette première étape vise i) à mettre en évidence la mobilisation de rythme thêta lors de la tâche, ii)

appréhender la(es) zone(s) cérébrale(s) potentiellement concernée(s) par une modification de l'activité neuro-oscillatoire thêta au cours de la tâche. Une seconde étape d'analyse est réalisée à l'échelle de la composante (MFT) afin de comparer l'implémentation du contrôle cognitif au travers des conditions pour chacun des groupes d'enfants. Des modèles de régressions sont construits pour étudier la MFT en fonction du groupe d'âge (préscolaire et scolaire) et de la condition d'interférence (cC, iC, cl, il).

3. Résultats

Les données cognitives évoquent :

- Pour les temps de réponses

Un effet principal du groupe est identifié indiquant que les enfants plus jeunes sont plus lents à répondre.

Au sein des groupes, un effet de la condition d'interférence a été mis en avant. Les analyses post-hoc révèlent que relativement à la condition d'interférence nulle (cC) toutes les conditions d'interférence génèrent un coût en termes de temps de réponse. Cependant, les coûts diffèrent indiquant la hiérarchie suivante : $cC < il < iC < cl$.

Pour les plus grands, seules les conditions d'interférences liées au task-set génèrent un coût (équivalent) conduisant à la hiérarchisation suivante : $cC = il < iC = cl$.

- Pour la précision

Un effet principal du groupe est également observé, les plus grands enfants étant plus précis. Cependant, les deux groupes manifestent des effets similaires quant aux effets d'interférence. En effet, le coût (en pourcentage de d'erreur) généré par l'interférence il par rapport à la condition d'interférence nulle est similaire pour les deux groupes. De plus, les deux sont identiquement affecté par l'interférence lié au task-set (cl et iC).

Les effets d'interférences sont résumés sur la figure 16.

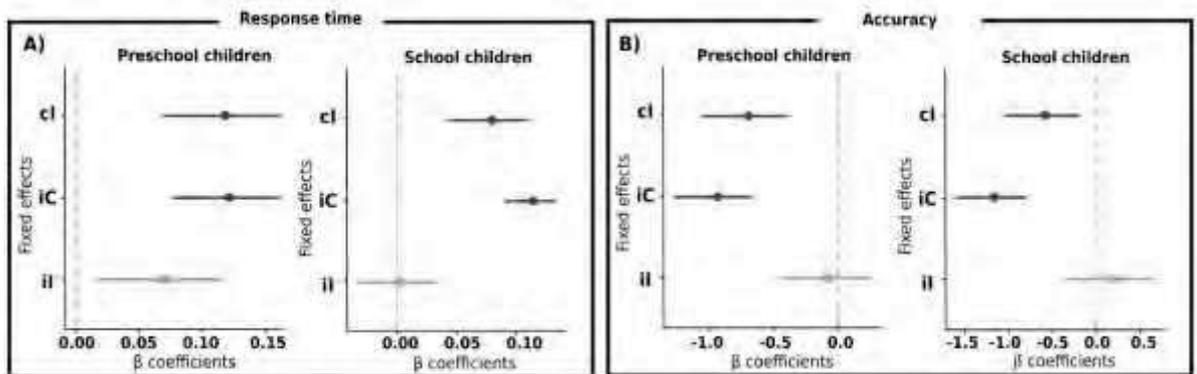


Figure 16. Représentation des effets d'interférence (et leur intervalle de confiance à 95%) obtenus pour chacune des conditions par rapport à la condition d'interférence nulle (ligne verticale en tirets) pour les enfants d'âge préscolaire et scolaire pour les temps de réponse dans le cadre de gauche et les pourcentages de réponse correctes dans le cadre de droite. Les performances à une condition d'interférence se différencient de celle observée à la condition d'interférence nulle dès lors que son intervalle de confiance ne chevauche pas la ligne verticale pointillée.

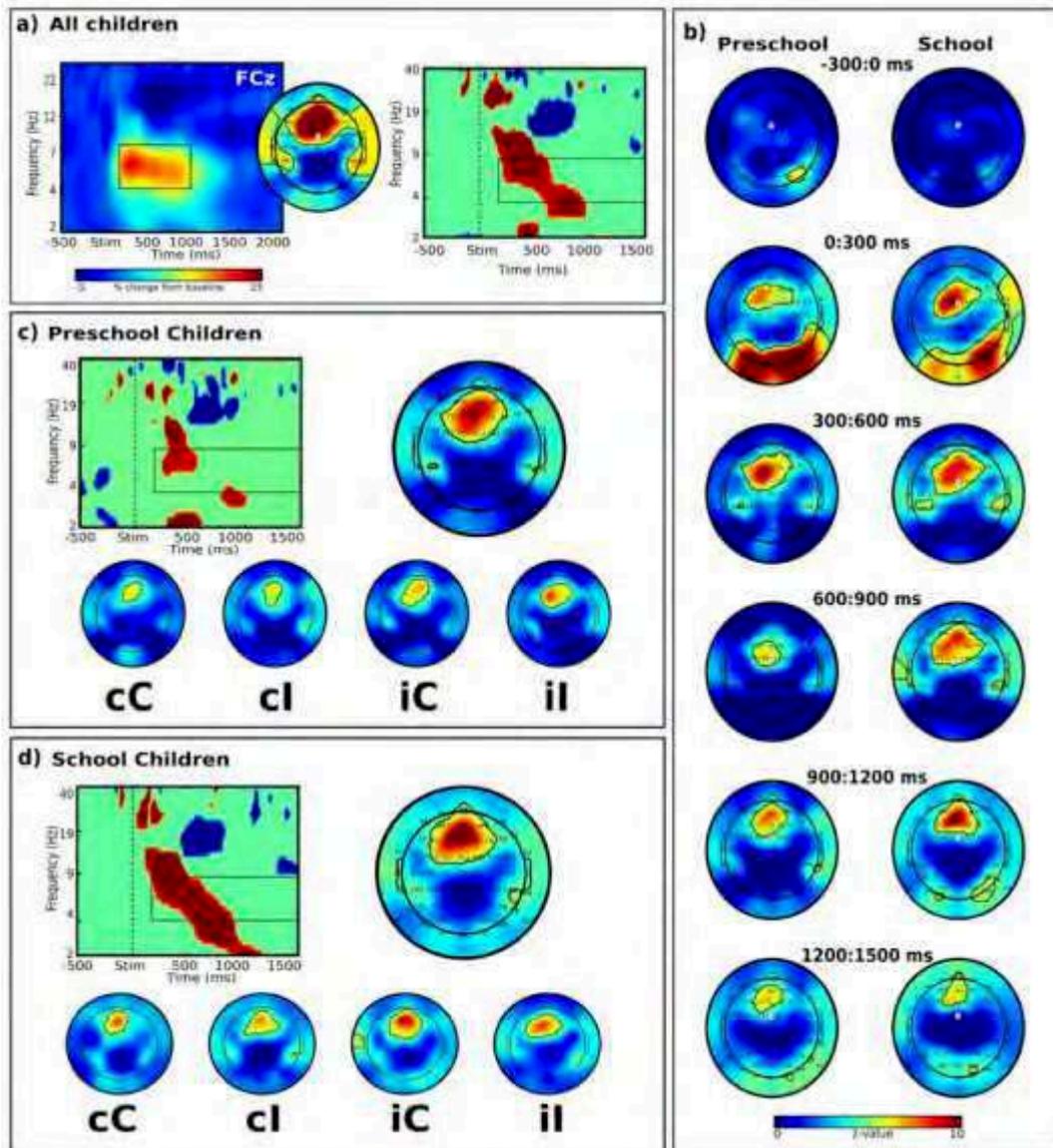


Figure 17 A) Représentation temps-fréquence de l'ensemble de données moyennée sur le groupe et la condition montrant une augmentation de l'amplitude de la puissance thêta par rapport à la période de référence (-400 à -100ms) à l'emplacement FCz. La distribution topographique de l'amplitude thêta [4-8Hz] entre 200 et 1500 ms est également présentée pour la condition et les données moyennées par groupe (un point blanc indique l'emplacement de FCz). Sur la droite, la permutation basée sur les groupes a été utilisée pour identifier un changement significatif par rapport à la période de référence à l'emplacement FCz. Le rectangle correspond à la fenêtre spatio-temporelle utilisée pour les tracés topographiques. Un tracé additionnel indique la valeur t correspondant à la comparaison corrigée par Bonferroni de l'amplitude de la puissance thêta à chaque instant par rapport à la ligne de base (le segment rouge correspond à une différence significative); B) Distribution topographique de la puissance thêta moyenne de l'état [4-8Hz] pour chaque groupe sur une période de 300 ms, de -300 à 1500 ms (le point blanc indique le site FCz); C) Permutation basée sur les clusters chez les enfants d'âge préscolaire montrant un changement significatif par rapport au niveau de référence à l'emplacement FCz. Le graphique en haut à droite correspond à la distribution topographique de l'amplitude de puissance thêta [4-8Hz] entre 200 et 1500 ms pour les données sur la condition moyenne des enfants d'âge préscolaire (le point blanc indique la position du FCz), tandis que les quatre distributions topographiques dans la partie inférieure du cadre montrent l'amplitude thêta spécifiques à une condition dans la même fenêtre temporelle. D) Identique à C pour les écoliers de primaire.

Les tests de permutations mettent en évidence une augmentation de l'amplitude de l'activité thêta lors de la réalisation de la tâche en comparaison avec la période de référence pour tous les enfants (figure 17.A). Cette augmentation est constatée entre 150 et 950ms ($p < .01$, voir figure 17.A et 17.B pour un découpage séquencé de cette activité neuro-oscillatoire). Par ailleurs, on relève que l'augmentation est constatée dans la région fronto-centrale pour les deux groupes (figure 17.C et 17.D). Lorsque l'on compare les conditions entre elles, Les données issues des mesures électrophysiologiques nous rapportent également que les jeunes enfants manifestent une latence du pic d'amplitude de thêta plus retardée que les enfants plus âgés (figure 18.A, une illustration de l'activité moyennée entre les conditions pour chaque groupe est présentée dans la figure 18.B). Ce résultat, précédemment reporté est assimilé à des différences développementales liées à la maturation cérébrale (myélinisation, élagage synaptique, croissance cérébrale).

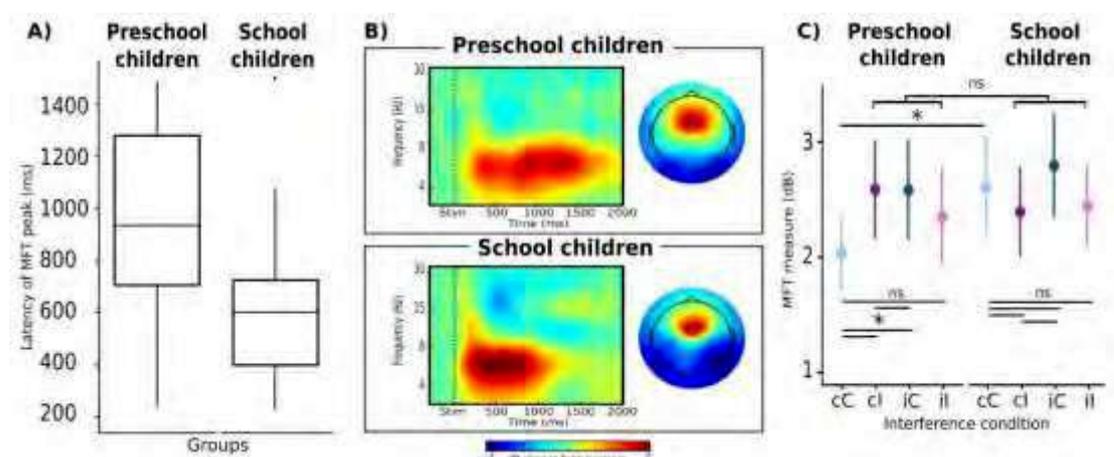


Figure 18. A) Boîtes à moustaches représentant la moyenne et la dispersion du pic d'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire thêta (en ms) lié au traitement du conflit mesuré sur l'ensemble des essais moyenné par sujet chez les enfants d'âge préscolaire et scolaire; B) Représentation en temps-fréquence de l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire de la composante mid-frontale thêta (en dB) moyennée au travers des conditions chez les enfants d'âge préscolaire scolaire thêta; C) Amplitude moyenne (en dB) de la mesure individuelle de l'activité neuro-oscillatoire thêta en fonction des groupes et des conditions d'interférence.

Les analyses sur la mesure de l'amplitude de thêta révèlent que les enfants plus jeunes manifestent une amplitude plus importante pour les essais impliquant une interférence liée au task-set. A la fois l'interférence de task-set seule et l'interférence double de task-set + Réponse, alors que l'interférence liée à la

réponse mais modulée par un effet de répétition (il) n'engage pas une amplitude de thêta significativement supérieure à la condition d'interférence nulle. Pour les enfants d'âge scolaire, aucune différence entre les conditions n'est trouvée. Cependant lorsque l'on compare l'amplitude de la mesure de thêta pour la condition d'interférence nulle entre les enfants de maternelle et de primaire on remarque que le groupe de primaire engage une amplitude de thêta significativement supérieure au groupe de maternelle (Figure 18.C).

Enfin une analyse du temps de réponse en fonction de la mesure de l'amplitude thêta recueillies pour chacun des essais ne révèle aucun effet prédictif de l'amplitude thêta sur le TR entre les conditions. On note uniquement que pour les enfants de maternelle une tendance se dégage indiquant que les essais associés à une amplitude plus faible sont aussi les essais montrant les temps de réponse les plus lents.

4. Discussion

Nous avons montré l'implication de l'activité neuro-oscillatoire thêta dans différentes situations d'interférence chez les enfants d'âge scolaire et préscolaire, suggérant un rôle général du rythme thêta en zone fronto-centrale dans l'implémentation de différents processus du contrôle cognitif et à différentes étapes de leur développement. Le rythme thêta est augmenté lorsque les participants engage spécifiquement leur contrôle au travers de processus d'inhibition de réponse automatique, ou d'alternance de task-set comme cela a déjà été montré chez l'adulte (Cohen & Donner, 2013; Cunillera et al., 2012; Nigbur et al., 2011b; Sauseng et al., 2006). De plus, nous avons mis en évidence une différence entre nos deux groupes d'âge dans leur façon d'engager leur contrôle cognitif dans la tâche. Chez les plus jeunes, les conditions mettant en jeu une interférence de task-set sont associées à une augmentation de l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire thêta par rapport à la condition d'interférence nulle. Ce constat a déjà été obtenu dans des études chez l'adulte où le niveau d'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire thêta était interprétée comme reflétant l'engagement du contrôle cognitif avec une plus grande puissance associée à de plus grandes demandes de contrôle cognitif (Cavanagh & Shackman, 2015; Hanslmayr et al., 2008; Wascher et al., 2014).

Résoudre une interférence de task-set est en effet très coûteux en termes de contrôle cognitif, comme le montrent les temps de réponse plus lents et la réduction de la précision pour les conditions concernées par une interférence de task-set chez les enfants d'âge préscolaire et scolaires. Cette constatation est cohérente avec de précédentes études développementales s'intéressant aux FEs et montrant que l'amélioration des performances à des tâches de conflit impliquant de la flexibilité est associée à la trajectoire développementale la plus longue par rapport aux autres EFs (Davidson et al., 2006). L'augmentation de l'activité neuro-oscillatoire thêta pour les conditions d'interférence de task-set pourrait donc être interprétée comme un marqueur du niveau d'implication du contrôle. Cette interprétation est renforcée par le fait que les enfants d'âge préscolaire ne montrent pas d'augmentation du rythme thêta lors de la gestion d'interférences de réponse sans interférence de task-set (essais II) et qu'en parallèle ils étaient tout aussi précis dans cette condition que dans la condition d'interférence nulle.

En revanche, chez les enfants plus grands on ne distingue pas de différence entre les différentes conditions d'interférence (condition d'interférence-nulle comprise), ce qui suggère que les enfants plus âgés seraient susceptibles de mettre en œuvre du contrôle cognitif de manière anticipative dans le cadre d'une tâche mixte dans laquelle ils sont dans l'incertitude quant à l'interférence à venir. L'augmentation de l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire thêta a déjà été associée au besoin d'ajustement dynamique du contrôle cognitif dans le cadre de tâches non prévisibles (van de Vijver et al., 2011; Womelsdorf et al., 2010). Cela pourrait suggérer que notre mesure de l'activité neuro-oscillatoire thêta puisse refléter une meilleure capacité de prise en compte du contexte de la tâche et de monitoring chez les enfants d'âge scolaire que chez les enfants d'âges.

5. Conclusion

Cette étude révèle l'intérêt de s'intéresser à l'activité neuronale sous-jacente à la mise en œuvre du contrôle cognitif dans différentes conditions d'interférences. Au travers de l'amplitude des oscillations thêta enregistrées en zone fronto-centrales, nous avons montré que la mise en œuvre de fonctions de contrôle cognitif se reflétait au travers d'un même mécanisme. En effet, chez l'enfant

comme chez l'adulte, le rythme thêta est impliqué dans l'implémentation du contrôle pour chacune des interférences, quelle que soit la nature des processus cognitifs requis. Par ailleurs, nous avons montré que l'activité oscillatoire thêta enregistrée en zone fronto-centrale est associée à une amplitude plus forte lors de la gestion de conflit sollicitant davantage le contrôle cognitif. De plus, nous avons montré que l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire pouvait refléter une différence développementale dans la gestion du conflit au travers d'une implémentation différente du contrôle cognitif chez les enfants plus matures. Ces résultats représentent un intérêt certain dans l'évaluation fine des différences développementales des processus impliqués dans la mise en œuvre du contrôle cognitif. Ils pourraient être utilisés pour caractériser le niveau de maturité du contrôle cognitif au sein d'une population d'âge semblable.

6. Article de chapitre

Article soumis à la revue *Developmental Science* et accepté le 15/12/2019.

doi: 10.1111/desc.12936 (matériels supplémentaires en annexes du manuscrit)

The role of midfrontal theta oscillations in the development of cognitive control during the preschool and school years

Nicolas Adam^{1,2*}, Agnès Blaye^{2,3}, Rasa Gulbinaite^{4,5}, Arnaud Delorme^{1,2,8} & Chloé Farrer^{1,2}

¹ Université de Toulouse, Centre de recherche Cerveau et Cognition, Toulouse, France

² Centre National de la Recherche Scientifique, France

³ Université Aix-Marseille, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille, France

⁴ Université de Lyon, Centre de Recherche en Neurosciences, Lyon, France

⁵ Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale U1028, Lyon, France

⁶ Swartz Center for Computational Neuroscience, University of California, San Diego, USA

* Corresponding author: m.nicolasadam@gmail.com ; Orcid ID: 0000-0001-6193-1472

Article published and available online : DOI: 10.1111/desc.12936

Highlights

- Through measures of mid-frontal theta oscillations in children, this study tests for a common mechanism underlying the development of different cognitive control processes.
- Mid-frontal theta power was increased during the resolution of task-set and response interferences in both preschool and school age children.
- Mid-frontal theta is involved in the development of different cognitive control processes and independently of the way cognitive control is structured.
- Mid-frontal theta latency was shorter in school children than in preschool children.

Abstract

The development of cognitive control enables children to better resist acting based on distracting information that interferes with the current action. Cognitive control improvement serves different functions that differ in part by the type of interference to resolve. Indeed, resisting to interference at the task-set level or at the response preparation level is respectively associated with cognitive flexibility and inhibition. It is, however, unknown whether the same neural mechanism supports the development of these two functions. Studies in adults have revealed the contribution of mid-frontal theta (MFT) oscillations in interference resolution. This study investigated whether MFT is involved in the resolution of different types of interference in children and for distinct periods of development that differ in the way cognitive control is structured. Preschool (4-6 years) and School children (6-8 years) were tested with a task involving interference at the response level and/or the task-set level while EEG was recorded. Behaviorally, response accuracy was affected by both task-set and response preparation interference. Both age groups were less accurate when the interference occurred at the task-set level and only the younger group showed decreased accuracy when interference was presented at the response preparation level. Furthermore, MFT power was increased, relative to the baseline, during the resolution of both types of interference and in both age groups. These findings suggest that MFT is involved in cognitive control development by orchestrating its different cognitive processes, irrespective of the cognitive function it serves (i.e., the type of interference to resolve) and of the structure of cognitive control.

Keywords: Cognitive control, early development, Theta, conflict, interference, EEG

1 Introduction

One important hallmark of cognitive development in children is the increased capacity to regulate behavior voluntarily, allowing children to better adapt their behavior to changing environmental demands for achieving a goal (Miller & Cohen, 2001). This capacity of cognitive control develops until adolescence and relies on the

progressive and asynchronous development of cognitive processes (i.e. inhibition of prepotent response and active maintenance of goal). This development is accompanied by an improved efficiency of cognitive functions called executive functions, like cognitive flexibility and inhibition. For example, during development, there is an increased capacity in detecting and resolving a conflict between task-relevant and task-irrelevant information (Zelazo & Jacques, 1997). Managing the conflict requires cognitive control for voluntarily inhibiting the processing of information that is irrelevant to an ongoing action and concomitantly enhancing the processing of information that is relevant for achieving the goal. In a classical conflict task, the Simon task, the stimulus is characterized by a task-relevant stimulus dimension (i.e. color or feature) and a task-irrelevant stimulus dimension (i.e. spatial location) (Simon & Berbaum, 1988). This task relies on the prepotent tendency to respond regarding the spatial location of the stimulus. Therefore, trials in which the responses elicited by task-relevant and irrelevant dimensions coincide (compatibility between the stimulus and the prepotent response) are typically associated with shorter responses times because of automatic and fast processing. However, in the incompatible trials, the two dimensions elicit a response interference, resulting in a conflict that must be detected and resolved for successful task performance. Resolving this conflict typically comes at a behavioral cost, termed the Simon effect, reflected by longer reaction times and lower accuracy scores compared to the compatible trials (O'leary & Barber, 1994). The size of the Simon effect has been shown to decrease with age, with most of the changes occurring during preschool and school years (Cao et al., 2013; Davidson, Amsó, Anderson, & Diamond, 2006; Ridderinkhof & van der Molen, 1995), reflecting improvements in inhibitory control.

The development of cognitive control also promotes behavioral flexibility, which allows switching between different tasks more easily (Miyake et al., 2000; St Clair-Thompson & Gathercole, 2006). Although switching and inhibition are well-differentiated functions, they also share common processes like active maintenance of a goal and inhibition of automatic response. Additionally, flexibility also requires to resist an interference that occurs at the task-set level. In the task-switching paradigm, the task-set interference is due to two task-sets that are associated with different stimulus-response mappings. Cognitive control is engaged for resolving the interference by inhibiting the previous task set and responding to the current one accordingly. This engagement entails behavioral costs, termed "local switch costs" reflected by increased reaction times and lower accuracy scores on the switch trials compared to the non-switch trials (Meiran, 1996; Monsell, 2003). These task switching costs particularly decrease during the pre-school and school ages, (Blaye & Chevalier, 2011; Chevalier & Blaye, 2008; Crone, Bunge, Van Der Molen, & Richard Ridderinkhof, 2006; Davidson et al., 2006; Kray, Gaspard, Karbach, & Blaye, 2013) and children reach adult-like performance in between the ages of 9 and 15 years (Bunge & Wright, 2007; Crone et al., 2006; Huizinga & van der Molen, 2011; Wendelken, Mumakata, Baym, Souza, & Bunge, 2012).

Cognitive control develops to a significant extent during the preschool years, extending into the beginning of the school years, resulting in improved inhibition and cognitive flexibility (Best, Miller, & Jones, 2009; Calderon, Jambaquié, Bonnet, & Angeard, 2014; Lucenet & Blaye, 2014). Furthermore, there is a change in the structure of cognitive control over this developmental period with an increase in the differentiation of executive functions (Miller, Giesbrecht, Müller, McInerney, & Kerns, 2012; Müller, Müller, Giesbrecht, Carpendale, & Kerns, 2013; Seun, Espy, & Kaufmann, 2004; Wiebe et al., 2011; Wiebe, Espy, & Charak, 2008), resulting in well-differentiated inhibition and flexibility functions from around 6-8 years old (Huizinga, Dolan, & van der Molen, 2006; Lehto et al., 2003). Improved efficiency of these functions are associated with neuroanatomical and neuro-functional changes in their respective fronto-parietal circuits (Bell & Wolfe, 2007; Casey et al., 2004; Ezekiel, Bosma, & Morton, 2013), which present differences in their maturation processes (Gogtay et al., 2004). Yet, the neural mechanisms that underlie the age-related changes in cognitive control are still poorly known. In particular, it is not known whether the same mechanism is in place for different executive functions as well as at distinct developmental periods that differ in the way cognitive control is structured (the degree of differentiation of its executive functions).

Neural oscillatory activity within the 4 - 8 Hz theta frequency range has been proposed to orchestrate cognitive processes within the neural circuits supporting cognitive control (Cohen, 2014; Nigbur, Ivanova, & Stürmer, 2011). The implementation of cognitive control requires the formation of functional networks in theta power (reflecting the activation of neurons in this frequency range), which is generated within the mid-frontal areas

(Cavanagh, Cohen, & Allen, 2009; Cohen & Cavanagh, 2011; Nigbur, Ivanova, & Stürmer, 2011) and allows the coordination of the neural computations underlying cognitive control within this network (Buzsaki & Draguhn, 2004; Doesburg, Vidal, & Taylor, 2013; Von Stein & Sarnthein, 2000). Theta power in mid-frontal areas is increased in conflict situations that require cognitive control for detecting and signaling the conflict to other brain systems involved in the selection of an action (Cohen & Ridderinkhof, 2013; Cohen & Donner, 2013; Gulbinaite, van Rijn, & Cohen, 2014; Nigbur et al., 2011). Furthermore, mid-frontal theta power enhancement was observed for different types of cognitive conflicts (Simon, Flanker, Stroop, Go-NoGo effects), suggesting that theta might reflect the engagement of cognitive control in various conflict tasks that necessitate important cognitive control demands (Jensen & Tesche, 2002; Nigbur et al., 2011; Richardson, Anderson, Reid, & Fox, 2018; Sheridan, Kharitonova, Martin, Chatterjee, & Gabrieli, 2014). Theta oscillations are also involved in task switching as indicated by increased theta power when the task set changed (Cunillera et al., 2012; van de Vijver, Richard Ridderinkhof, & Cohen, 2011; Womelsdorf, Johnston, Vinck, & Everling, 2010). Mid-frontal theta power enhancement might reflect the engagement of cognitive control to resolve the interference between the previous and the current task-sets. Overall, these findings suggest that mid-frontal theta power might reflect the engagement of cognitive control in various conflict tasks and at different levels of conflict (task-set and response preparation).

Theta oscillation has been reported to serve different top-down cognitive functions during childhood. For example, as early as 5 months age, efficient gaze direction control or speech perception are reported to rely on theta oscillatory activity (Bosseler et al., 2013; Michel et al., 2015). Theta oscillations were also found to be associated to cognitive control over different developmental periods (Fox, Henderson, Rubin, Calkins, & Schmidt, 2001; Morasch & Bell, 2011). Widespread increase in theta power relative to the baseline were observed in tasks targeting different executive processes across different ages: in infants (Bell, 2002; E. V. Orekhova, Stroganova, Posikera, & Elam, 2006; Elena V. Orekhova, Stroganova, & Posikera, 1999), toddlers (Conejero, Guerra, Abundis-Gutiérrez, & Rueda, 2018), as well as kindergarteners (Bell & Wolfe, 2007; Watson & Bell, 2013; Wolfe & Bell, 2004). Recently, Meyer and colleagues (Meyer, Endedijk, van Ede, & Hummies, 2019) reported that fronto-medial power was enhanced in preschool children when they engaged in a cognitive task.

Based on the evidence of an involvement of theta oscillation in different executive functions in adults as well as its association with the development of cognitive control, we hypothesized that theta oscillations might play a general role in the development of cognitive control by being involved in the implementation of cognitive control for different cognitive control processes (i.e., for the resolution of distinct types of interference) and for different structures of cognitive control (i.e., at distinct developmental periods that differ in the degree of differentiation of the executive functions). We therefore tested kindergarten (4 to 6 years) and primary school children (6 to 8 years) with an adapted version of the “heart and flower” task by Davidson et al., (2006) that offers different situations of interference. In this task, switch and non-switch trials were randomly mixed with compatible and non-compatible trials, requiring the engagement of cognitive control for resolving the interference at the response level (in the incompatible trials) and/or the task-set level (in the switch trials). We predicted that mid-frontal theta power would increase during the resolution of an interference at the task-set level as well as at the response level compared to the baseline. We also predicted that this increase would be observed in both preschool and school children.

2 Material and methods

2.1 Participants

A total of 114 children aged 4.01 to 8.83 years were recruited from two Kindergarten French schools (N = 71) and one Elementary French school (N=43). Sixteen participants were removed from the analyses because of very poor performance on the task (error rate > 45%; N = 8), technical problems during EEG recording (N = 7), or because they stopped the task before the end and did not allow the collection of enough data (N = 1). The attrition mainly concerned the preschool children. Behavioral analyses were finally conducted on 98 children,

57 preschool children (mean age = 5.15, years \pm 6.3 months, 21 boys) and 41 school children (mean age = 7.56 years, \pm 10.6 months 17 boys).

Children were tested individually by an experimenter in a quiet room at their school. The testing session lasted approximately an hour, with 35 minutes dedicated to the EEG set up. The first period of familiarization allowed children to get accustomed to the materials and the task. They were first provided with some brief information about the EEG material and its use, the experimenter then explained the task to the children and set-up the EEG cap on the children's head.

The study was approved by the local ethics committee (N^o 2-15038) and was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki. Informed consent was obtained from parents and children gave verbal approval before starting the experiment. Children were rewarded with a small gift and a 'diploma' at the end of the testing.

2.2 Apparatus and stimuli

Children were comfortably seated at a viewing distance of 0.4 m from a Mac Laptop (13.3-in, screen refresh rate: 60Hz). The stimuli were presented with the OpenSesame software (Mathôt, Schreij, & Theeuwes, 2011). Children were presented with a central black fixation cross (7 mm diameter, 1°) on a white background, with either a red heart or a red flower (30 mm diameter, 4.3°) appearing on the left or the right (20 mm, 2.87° eccentricity) of the fixation cross. Children were instructed to respond as fast as possible when a stimulus appeared, using a button box with two buttons (for left and right index fingers) whose pressure was adapted to children's fingers' strength. The stimulus remained on the screen until a response was made or a maximal response time limit was exceeded, the duration of which differed between school and preschool children. Time limitation was dependent upon the age group to ensure a similar level of difficulty across children. Following Davidson and colleagues (2006), we chose a 2500 ms time response window after the stimulus onset for the preschool children (younger than 6.5 years old). For school children (older than 6.5 years old), we followed the recommendations of previous researchers and extended the original time window (750ms), resulting in a time window of 1500ms (Calderon et al., 2014; Obradović, Sulik, Finch, & Tirado-Strayer, 2018). Following a response, children received visual and auditory feedback with a low-pitched tone of 500ms accompanied by a surprised face for an incorrect response (same feedback was used in case of no-response trials), and a high-pitched tone of 500ms accompanied by a happy face for a correct response.

2.3 Procedure

The task was adapted from the 'heart and flower' task of Davidson et al., (2006). In the original task, compatible and incompatible trials were presented either in separate blocks or mixed. In the present study, we used only the mixed-trial condition that presents randomly compatible and incompatible trials during the same block. The choice of using only the mixed-trial condition of the original task was justified by the main objective of this study: evaluate the role of mid-frontal theta in the development of different cognitive control processes. Based on previous studies, maximal conflict effects and age differences were observed only in the mixed-trial condition (Calderon et al., 2014; Davidson et al., 2006; Diamond & Ling, 2016). Finally, the constraints of EEG recording and analysis with children were also taken into account (Bell & Cuevas, 2012). EEG analysis requires a sufficient number of trials per condition, thus we limited the experimental design to the mixed condition to keep recording sessions relatively short, in order to minimize children's fatigue and keep them concentrated and engaged in the task.

If the "heart" stimulus was presented on the screen, children were instructed to press the response button that was compatible with the location of the stimulus on the screen (i.e. press left if the heart appeared on the left). If the "flower" stimulus appeared on the screen, children were instructed to press the opposite-side button from that of the stimulus location (i.e. press right if the flower appeared on the left). Because the "flower" trials involved a conflict between the location of the response and the location of the stimulus, these trials were considered as incompatible trials, while the heart trials were considered as compatible trials. Compatible and incompatible trials were randomly presented throughout the experiment, resulting in sequences of trials where

the rule was the same than the preceding trial (non-switch trials) and trials in which the rule changed (switch trials).

Children first performed three training blocks to become familiarized with the task. These training blocks consisted of compatible only, incompatible only and mixed-trial blocks with the same order of presentation for all children. For each training block, children received and completed 4 trials without response time limitation. During practice and also during experimental trials, children received positive or negative visual and auditory feedback after each response. If they understood the task well, they then performed a practice block of 12 trials with response time limitation. Training practice could be carried out up to three times if the task had not been fully understood. If the child demonstrated at least 75% of correct responses during the training session and if he was able to explain the rules to the experimenter, the experimental session was then started (Diamond, Steven Barnett, Thomas, & Munro, 2007).

The experimental session was composed of 8 blocks of 16 trials each (128 trials in total), with same number of compatible and incompatible trials randomly ordered with an inter-trial interval that randomly varied between 400 and 1600ms. Rules were reminded at the beginning of each block, systematically marked by a short interruption. Longer breaks were proposed to the children if needed (experimental paradigm is schematized in figure 1).

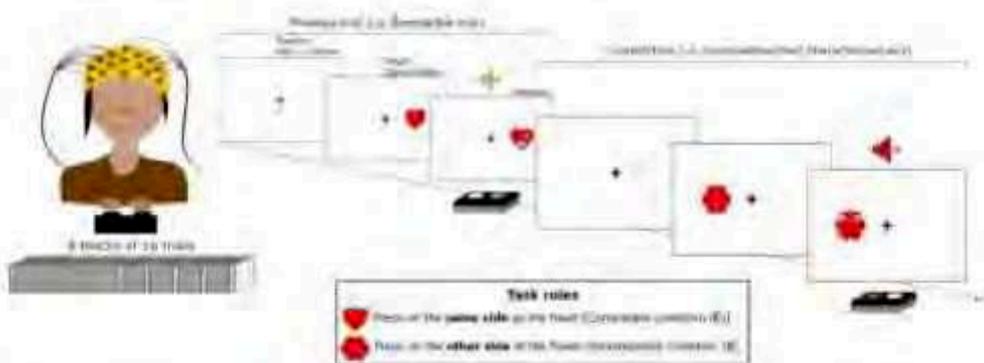


Figure 1. Experimental protocol and stimuli. When a heart appeared on the screen children were instructed to press on the same side as the stimulus (i.e. press left if the heart appeared on the left). When a flower stimulus appeared on the screen, children were instructed to press on the opposite side of the stimulus (i.e. press right if the flower appeared on the left).

2.4 EEG recording and preprocessing

EEG was recorded for 87 children (52 Preschool children and 35 School children) in a quiet room of the schools. Stimuli were displayed on a Macintosh laptop (MacBook Pro, 13 inches, 2.9 GHz Intel Core i7) and EEG monitoring and recording was conducted with another identical Macintosh laptop. We used a Biosemi Active-Two amplifiers system with 64-channel positioned according to the 10-20 International system (American Electro-Encephalographic Society, 1991) with two additional online references placed at occipital sites.

The acquisition software was ActiView (a LabVIEW toolbox designed by BIOSEMI). Prior to recording, impedance was checked to be below the 20 offset threshold using the ActiView impedance indicator. All offline data preprocessing and analyses were done using EEGLAB toolbox (v.14.1.1) for Matlab (sccn.ucsd.edu/eeglab/) and custom-written Matlab scripts. EEG was recorded with a 2048 Hz sampling rate and was then down sampled to 512 Hz. Data were high-pass filtered at 1Hz, notched filtered at 50 Hz (using CleanLine EEGLAB plugin v1.03) and re-referenced to average reference. Epochs were extracted from continuous data from -1500 to 3000 ms relatively to the stimulus onset. This large epoch's size allows performing time-frequency decomposition at low frequencies. For electrode-level analysis, noisy channels were identified by visual inspection and interpolated using spherical interpolation (function *eeg_interp* of EEGLAB). The first epochs containing large ocular, motor artefacts or very noisy signal (during baseline or stimulus processing time) were visually identified and manually rejected from the dataset to optimize the subsequent component identification process.

Furthermore, we also excluded participants for whom the previous artefact rejection procedure led to the removal of more than 40% of the total number of correct trials. Thereafter, independent component analysis (ICA) was performed on clean data (Delorme & Makeig, 2004). Components that did not account for brain activity (eye-blinks, horizontal eye-movements or muscle activity) were manually identified (using Independent Component Analysis) and subtracted from the data (Chaumon, Bishop, & Busch, 2015). This corresponded to an average of 0.9 component per participant. Only data epochs corresponding to correct responses trials were included in the analysis, errors, post-errors, anticipatory responses, as well as warm-up trials (the first trial of each block that could not be classified as a sequential condition) were removed from the data (1361 trials were rejected in total; 740 for Preschool children and 641 for School children). Following the experimental design of Davidson et al., (2006), inter-trial-interval varied between 400 ms and 1500 ms. In order to avoid a non-neutral baseline period due to brain activity related to the previous trial affecting time-frequency analyses, trials with ITI < 800ms were also excluded from the EEG analyses (N = 70 trials). There were no drastic differences between each condition in the final sample of EEG trials (N = 5821 trials) with, for preschool-children (693 cC - 763 cI - 769 iC - 687 iI), and for school children (682 cC - 753 cI - 737 iC - 637 iI). Children who were excluded from the behavioral analyses were also excluded from the EEG analyses. At this step 75 children were retained in EEG analyses.

2.5 Time-frequencies analysis

We first conducted a channel-level analysis. For this, the surface-Laplacian, using laplacian perrinX function (Cohen, 2014), was applied to artefact-free data prior to analysis to increase the topographical specificity and attenuate volume conduction (Kayser & Tenke, 2015). Time-frequency decomposition was performed by convolving stimulus-locked single-trial data from all electrodes with complex Morlet wavelets which increased from 2 to 40 Hz in 40 logarithmically spaced steps, and wavelet cycles varied from 3 to 6 in logarithmically spaced steps.

From the resulting complex signal, an estimate of frequency band-specific power at each time point was defined as the squared magnitude of the result of the convolution. Single-trial power values were then averaged across trials for each condition separately, and then normalized relative to the condition-average baseline period (-400 to -100 ms) using a decibel (dB) transform at each frequency. Conversion to a dB scale ensures that data across all frequencies, time points, electrodes, conditions, and participants were in the same scale and thus were comparable. The use of a short baseline window was the most appropriate approach to avoid a contamination of the previous trial activity over subsequent trials as reported in previous studies (Nigbur, Cohen, Ridderinkhof, & Stürmer, 2012; [-350 to -150ms] ;for Nigbur et al., 2011; [-300 to -100ms] for Cavanagh et al., 2009; Cohen & Cavanagh, 2011; Cohen & Ridderinkhof, 2013; Cohen & Donner, 2013b; Gulbinaite et al., 2014 ; [-200 to -50ms] for Cunillera et al., 2012).

2.6 Analytical procedure

To assess the engagement of theta oscillations in the resolution of different types of interference in preschool and school children, we took into account all the interference conditions for the analyses of both children's behavioral and EEG data.

The task involved different interference conditions (presented in Table 1). The cC interference condition consisted of compatible trials (C) that were preceded by a compatible trial (c). This condition corresponded to the null-interference condition because no interference was elicited. In iI condition, incompatible trials (I) were preceded by incompatible trials (i), here the interference is related to the conflict generated by the two dimensions of the stimulus (the relevant and irrelevant dimensions of the stimulus), this interference was subsequently called repeated response interference. iC condition refers to compatible trials (C) preceded by incompatible trials (i) and the conflict was related to the change in the stimulus-response mapping between the previous and the current trials, this interference was subsequently called task-set interference. Finally, in the cI condition incompatible trials (I) were preceded by compatible trials (i), resulting in two types of interference, one related to the conflict between the two dimensions of the stimulus and the other to the change in the stimulus-response mapping. This interference was subsequently called task-set and response interference.

Table 1: representation of the different interference conditions of the mixed task

		Task-set interference	
		Yes	No
Response interference	Yes	cI	iI
	No	iC	cC

For each child, two different behavioral measures were obtained: the response time (RT in ms) and the accuracy (percentage of correct responses). Incorrect and anticipatory responses (below 200ms), omitted and post-errors trials were removed from the RT data analyses. Response times greater than 3 standard deviations of the mean were considered as outliers and were rejected. The first trial of each block was considered as a warm-up trial and was also removed prior to the analyses. Response times and accuracy were analyzed using a general linear mixed model approach allowing for specification of random effects. We used this statistical model because it allows accounting for the trial-to-trial variability, increasing the ability to detect the effect of fixed parameters. Moreover, the number of trials was slightly different between conditions, and GLM accommodates an unbalanced experimental design. GLMer analyses were conducted using the function `glmer` (Bates, Mächler, Bolker, & Walker, 2015) of the R package `lme4` (R Core Team, 2014). GLMer with Gamma family (with log link) was performed on RTs whereas Binomial family (with logit link) was used for accuracy. Normality of residuals was checked via qq plot and the histogram of the residuals, a plot of standardized residuals against predicted values, was used to check for deviation from homoscedasticity. We included as fixed effects an Interference factor with 4 levels (cC, iI, cI, iC), a Group factor (Preschool and School children) and the interaction between group and interference factors; participants (model the intra individual variability) and the

interaction between participants and condition (model the intra individual variability across conditions) were added as random factors. We reported the regression coefficients relative to the reference condition (e.g. the null-interference condition in Preschool children), with their corresponding 95% confidence intervals (indicated in brackets), as well as an estimation of the effects expressed in ms for RTs and in percentage for accuracy. T-values and their corresponding p-values were also reported. When necessary, post hoc comparisons with fdr adjustments (correction for multiple comparisons) were also conducted with the Welch-Satterthwaite method. These tests were conducted to compare performance between conditions for Preschool and School children independently as well as between Preschool and School children's mean performance. P-value was computed from the Wald statistic (alias the z-value, corresponding to the estimate of the coefficient divided by its standard error).

Our statistical analyses involved two main steps. We first determined whether the task induced a significant increase in theta power related to the baseline period. This step was done using the entire sample of EEG data. Previous studies showed that mid-frontal sites around FCz channel are active during interference tasks that require cognitive control (in adults: (Michael X Cohen & Donner, 2013a; Gulbinaite & Johnson, 2014; Nigbur et al., 2011); in children: (Lamm, Zelazo, & Lewis, 2006a; Papenberg, Hämmerer, Müller, Lindenberger, & Li, 2013); for review see (Crone & Steinbeis, 2017)). A cluster-corrected analysis was performed to determine whether theta power amplitude at the FCz location was increased during the task compared to the baseline period (-400ms to -100ms). A permutation procedure (with 1000 permutations) was applied with the null hypothesis defined using the pre-stimulus baseline period and cluster-correction was performed to identify the time-frequency period at which FCz power was enhanced (using z-test). A permutation approach (corrected for multiple comparison) was then applied on the 64 channels for all the children in the theta frequency band over the window from 200 to 1500 ms to appreciate the distribution of MFT power amplitude increase at the topographic level. We visualized topographical distribution of theta-band activity over time in steps of 300 ms (Figure 3b). Although previous reports in adults showed that theta is centered around frontocentral FCz channel (Gulbinaite et al., 2014; Lamm, Zelazo, & Lewis, 2006b; Nigbur et al., 2012; Papenberg et al., 2013), visual inspection of spatiotemporal patterns of theta-band activity revealed that both groups showed a typical midfrontal theta (MFT) peaking around FCz (Figure 3c and 3d).

In a second step, we compared the increase in theta power amplitude between task conditions, unrelated to the baseline level. Given the inter-individual topographical differences in theta-band peak, we isolated mid-frontal theta power using optimal spatial filters – a weighted combination of all channels – designed to maximize power in the theta band (Cohen, 2017, 2019; Cohen & Gulbinaite, 2017; Duprez, Gulbinaite, & Cohen, 2018; Gulbinaite, van Viegen, Wieling, Cohen, & VanRullen, 2017). This approach belongs to the class of “guided” as opposed to “blind” (e.g. independent component analysis) source-separation methods (Cheveigné & Arzoumanian, 2015; Nikulin, Nolte, & Curio, 2011). Artfactual independent components were removed only for electrode-level analysis, while midfrontal theta spatiotemporal source separation was done on full-rank data. Because the data were pooled over conditions the window selection was orthogonal to the effects that we were interested in (Cohen & Gulbinaite, 2017). The spatial filter was designed in a way that was blind to the condition of any given trial. To preserve the maximum of information, only clearly identifiable eye blink component was removed (Chaumon et al., 2015).

For each participant, a single component with the typical mid-frontal spatial peak and theta-band temporal dynamics (phasic theta-power increase following stimulus onset) was identified and selected for further analyses (more details about the MFT component extraction are provided in the supplemental materials). In cases when no single MFT component could be identified, participant was excluded from further analysis. Among the 75 participants with analyzable EEG data, 6 did not show MFT component (five preschool children and 1 school child).

Conflict-related brain activity was extracted during cognitive control processing (stimulus-locked analysis) time windows (Cavanagh, Zambrano-Vazquez, & Allen, 2012; Gulbinaite & Johnson, 2014). A first exploration of the temporal distribution of theta power in our two groups revealed that theta power was enhanced in participant-specific stimulus-locked windows with an earlier peak and temporally less diffused window for School children

than for Preschool children. We therefore selected the time windows on an individual basis. Considering the developmental differences in children of our groups, an extended temporal window (compared to the window identified on the averaged dataset with the permutation testing) was applied identically for all children. Thus, we first identified individual theta power peak in the condition-averaged data within the window 200 to 1500ms, then a short participant specific window was determined around the peak in frequency ($\pm 1\text{Hz}$) and in time ($\pm 150\text{ms}$). Theta power within this specific window was averaged for each condition to compute the individual MFT (see an illustration of the procedure in the supplemental material). These measures were normalized to perform single-trial analyses. For average analyses the theta measure was computed by averaging baseline mean-corrected power values of mid-frontal theta component into the participant-specific time window. Finally, 69 participants were included to the final sample for EEG analyses (36 Preschool children and 33 School children). This attrition corresponded to a loss of approximately 21% of the participants that is quite classic in studies with children, principally the youngest (Bell & Cuevas, 2012; Wolfe & Bell, 2004, 2007).

Then, EEG analyses were conducted on the latency of the MFT peak (detected on the condition-averaged data for each participant) and the power of the MFT peak (estimated for each condition of each participant). A GLM model (Gamma distribution) was conducted with the log-transformed latency of the peak as the dependent variable and group factor (Preschool and School children) as a fixed effect.

The normally distributed MFT power was analyzed with a lmer model with MFT power measure as the dependent variable, the Interference factor, the Group factor as fixed effects and the inter-participant variability as a random effect. Finally, previous results have shown that theta power predicted behavioral performances in cognitive conflict task in both adults (Cohen & Donner, 2013; Gulbinaite & Johnson, 2014; Töllner et al., 2017) and children (Liu, Woltering, & Lewis, 2014) and that age-related changes in theta power explained the age-related changes in cognitive control performance (Liu et al., 2014). We therefore assessed whether variation in children's RTs was partially predicted by variation in MFT power. GLMer models were performed on the single trial Log-transformed RT as dependent variable with as fixed effects the Group factor, the Interference factor, the z-transformed single trial MFT power as well as the interactions between all these factors. Inter-participant variability as well as intra-condition variability were added as random effects.

3 Results

3.1 Behavioral results

3.1.1 Response Times

Overall, School children were faster than Preschool children ($z=11.66$, $p<.0001$), with an average response time of $878 \pm 21\text{ms}$ and $1259 \pm 25\text{ms}$ for School and Preschool children respectively. Children's response times also varied as a function of the interference conditions (see the supplemental materials for the results of all the models). In particular, Preschool children were slower in all the conditions involving an interference compared with the null-interference condition (cC) as shown by significant positive betas for all conditions relative to the reference condition (CC condition in Preschool children). Post-hoc comparisons further revealed that preschool children were faster at resolving an interference between two response alternatives than when the interference occurred at the task-set level (between the previous and the current stimulus-response mappings). They, however, were equally fast in the two interference conditions involving a change in the task-set (cC < iI < cI = iC, see all the statistics in the table 2 and the figure 2a).

School children were equally fast in the null interference condition than in the condition involving an interference between two response alternatives. But they were faster in this interference condition than in the conditions involving a change in the task set. They were also faster at resolving an interference occurring at both the task set level and the response level than when the interference only occurred at the task-set level (cC = iI < cI < iC, see the table 2 for all post-hoc comparison, full the statistics are provided in the supplemental materials).

3.1.2 Accuracy

A main effect of age was found. School children were more accurate than Preschool children ($z = -3.29$, $p = 0.01$) with an average accuracy of $95.1 \pm 0.82\%$ and $90.3 \pm 1.2\%$ for Preschool and School children respectively.

While they were as accurate in the null-interference condition as in the condition involving an interference between response alternatives, accuracy scores of both Preschool and School children decreased in the interference conditions involving a change in the task-set compared to the null-interference condition. The two groups were also more accurate at resolving an interference at the response level than at the task-set level and when the interference occurred at both the task-set and the response levels than when it only occurred at the task-set level (for both Preschool and School groups: $rC = iI < cI < rC$; see the table 2 for all post-hoc comparison, full the statistics are provided in the supplemental materials and visualization of the group specific interferences effect on figure 2b).

Although we have no hypothesis with regards to the differences between the intermediate interference conditions, behavioral results indicated that the response interference was less difficult to resolve in the two task-set interferences. Indeed, even if Preschool children's response times were slower in this condition, they had the same accuracy scores than in the null interference condition suggesting that might have decreased their response times in order to respond accurately.

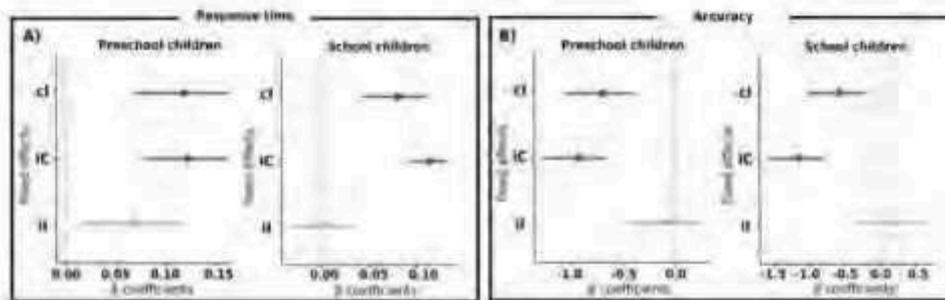


Figure 2 Regression coefficients (with their corresponding 95% confidence intervals) for A) Response Time and B) Accuracy scores in the different interference conditions (II, cI, iC) compared to the reference condition (i.e. the null-interference condition of each group; models were run independently in each group to visually appreciate the difference between interference conditions within groups). For recall, if a confidence interval crossed the dash line (representing the reference condition), it means that accuracy scores in the interference condition do not differ from that of the reference condition.

Table 2. Post-hoc comparisons were conducted for comparing response times between interference conditions in Preschool and School children independently. Mean differences are reported as delta values with their corresponding standard errors. The associated z- and p_ values are also reported (significant differences are indicated by grey cells).

contrasts	RT (ms)		Accuracy (%)	
	Preschool children	School children	Preschool children	School children
cC / iC	(z=-6.786, p<.0001) Δ = -146.64 ± 22ms	(z=-5.519, p<.0001) Δ = -99.83 ± 18ms	(z=6.114, p<.0001) Δ = 8.34 ± 1.36%	(z=5.738, p<.0001) Δ = 7.88 ± 1.37%
cC / cI	(z=-5.597, p<.0001) Δ = -141.19 ± 25ms	(z=-3.198, p=.0021) Δ = -67.06 ± 21ms	(z=4.060, p=.0001) Δ = 5.31 ± 1.31%	(z=3.376, p=.0009) Δ = 3.44 ± 1.02
cC / iI	(z=-3.018, p=.0038) Δ = -79.23 ± 26ms	(z=-0.008, p=.9934) Δ = -0.18 ± 22ms	(z=0.575, p=.565) Δ = 0.61 ± 1.06%	(z=-0.975, p=.329) Δ = -0.65 ± 0.67%
iC / cI	(z=0.288, p=.7734) Δ = 5.45 ± 19ms	(z=2.112, p=.0416) Δ = 32.77 ± 16ms	(z=-2.181, p=.035) Δ = -3.04 ± 1.39%	(z=-3.366, p=.0009) Δ = -4.44 ± 1.32%
iC / iI	(z=2.703, p=.0083) Δ = 67.42 ± 25ms	(z=4.849, p<.0001) Δ = 99.66 ± 21ms	(z=-5.430, p<.0001) Δ = -7.73 ± 1.42%	(z=-5.908, p<.0001) Δ = -8.53 ± 1.44%
cI / iI	(z=3.239, p=.0024) Δ = 61.97 ± 19ms	(z=4.417, p<.0001) Δ = 66.89 ± 15ms	(z=-3.886, p=.0002) Δ = -4.69 ± 1.21%	(z=-4.161, p=.0001) Δ = -4.09 ± 0.98%

3.2 EEG Results

Cluster analyses done at the electrode-level revealed an increase in theta power amplitude compared to the baseline period at the FCz location, in both groups (Figure 3a). An additional Bonferroni-corrected two-tailed t-test revealed that theta power amplitude was enhanced in the 150ms to 950ms period compared to the baseline (p<.001) for the FCz channel (for data average on the group and on the condition). Permutation z-tests on the 64 channels with all the children in the theta frequency band during the task-related period showed a widespread increase in MFT power amplitude (p<.001). Figure 3b shows the topography of MFT power amplitude distribution over the trial. Task-related increase in MFT related to baseline was found on the average condition and separately for each condition in both groups (see figure 3c for preschool children and 3d for school children). The significant area did contain the FCz location. However, with regard to the width of the selected time window (because of inter-participant difference), more diffused mid-frontal theta power was observed in the plot.

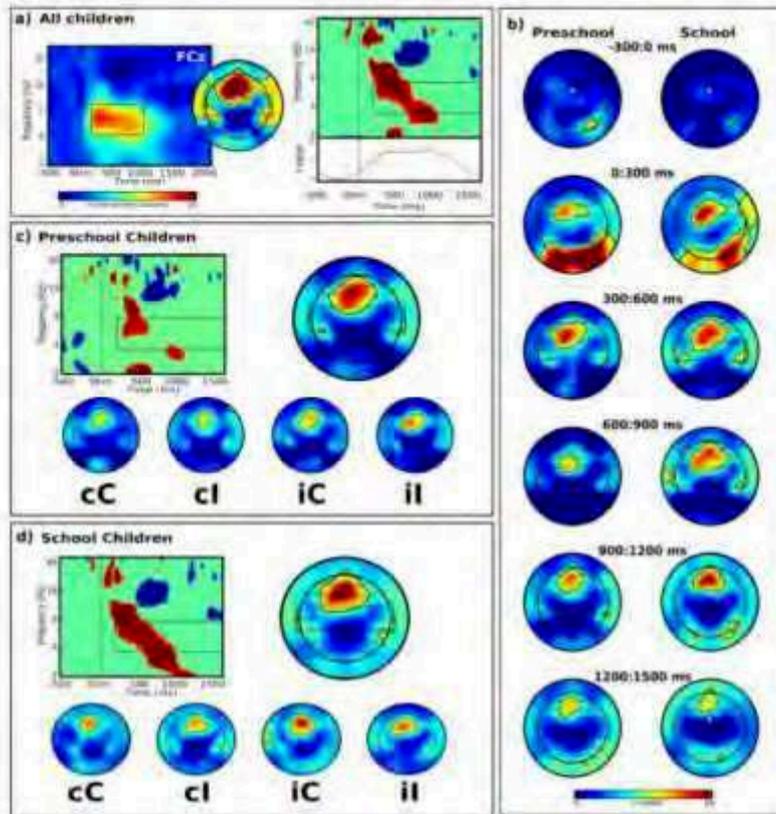


Figure 3 A) Time frequency representation of the whole dataset averaged on group and condition showing an increase in theta power amplitude compared to the baseline at the FCz location. The topographical distribution of the theta power amplitude [4-8Hz] between 200 and 1500ms is also presented for the condition and group averaged data (white dot indicates to the FCz location). On the right, cluster-based permutation was used to identify significant change relative to the baseline at the FCz location. The rectangle corresponds to the spatio-temporal window used for topographic plots. A subplot indicate the t-value corresponding to the Bonferroni-corrected comparison of theta power amplitude at each time vs baseline (red segment correspond to significant difference); B) Topographic distribution of condition average theta power [4-8Hz] for each group over 300ms period from -300 to 1500ms (white dot indicate the FCz site); C) Cluster-based permutation in preschool children showing significant change relative to the baseline at the FCz location. The right upper plot corresponds to the topographical distribution of the theta power amplitude [4-8Hz] between 200 to 1500ms for the condition averaged data of preschool children (white dot indicates to the FCz location), whereas the four topoplots at the bottom shows the condition specific topographical distribution of theta amplitude in the same time window. D) Same as C for School children.

However, given the difference in brain maturation and the topographical differences in mid-frontal theta across participants and groups, traditional single FCz electrode analysis approach would have been suboptimal for a subset of participants. Therefore, we applied a guided multivariate spatiotemporal filtering technique (Cohen, 2017; Duprez, Gulbinaite, & Cohen, 2018; Gulbinaite, van Viegen, Wieling, Cohen, & VanRullen, 2017), which allowed us to combine information from all recorded electrodes and to isolate mid-frontal theta activity (for details, see Methods section). All the following analysis results are reported for mid-frontal theta component.

3.2.1 Analyses of average mid frontal theta peak latency

Comparing the MFT peak latencies between groups we found that the peak occurred earlier in School children compared to Preschool children ($t(67) = -4.538$; $p < .0001$), with a difference estimated at -368.43ms [203.26 533.61]. While School children's peak occurred around $587.12 \pm 45.52\text{ms}$ the peak was observed at around $955.56 \pm 70.93\text{ms}$ in Preschool children (MFT power peak latencies by group are represented in figure 4a).

3.2.1.1 Relation between reaction times and theta peak latency

Children's response times were explained by the latencies of mid frontal theta with longer response times associated with longer latencies ($\beta = 0.0002$ [$0.0001, 0.0002$]; $t = 3.125$; $p < .01$), and we did not distinguish any differences in this relation for both Preschool and School children ($\beta = -0.0001$ [$-0.0002, 0.0001$]; $t = -0.925$; $p = .359$).

3.2.2 Analyses of average mid frontal theta power

Overall, MFT power did not differ between Preschool and School children ($\Delta = -0.172$ [-0.58 0.236]; $t(197.68) = -0.831$, $p = .407$) (Condition-average MFT power by group are represented in figure 4b). However, some differences were observed between groups for some interference conditions (see figure 4c). In particular, MFT power was higher in School children than in Preschool children in the null-interference condition ($\beta = 0.584$ [$0.015, 1.153$], $t(197) = 2.011$, $p = .045$).

Furthermore, in Preschool children MFT power was increased in the interference conditions involving a change in the task-set compared to the null-interference condition ($\beta_{cI} = 0.562$ [$0.111, 1.012$], $t(201) = 2.441$, $p = .015$; $\beta_{iC} = 0.554$ [$0.103, 1.005$], $t(201) = 2.408$, $p = .017$). However, MFT power did not vary when the interference occurred at the response level compared to the null interference condition ($\beta_{iI} = 0.321$ [$-0.129, 0.772$], $t(201) = 1.397$, $p = .163$).

In School children MFT power did not differ between the interference conditions ($cC - cI$: $t(197.68) = 0.923$, $p = .5601$; $cC - iC$: $t(197.68) = -0.776$, $p = .560$; $cC - iI$: $t(197.68) = 0.729$, $p = .5601$).

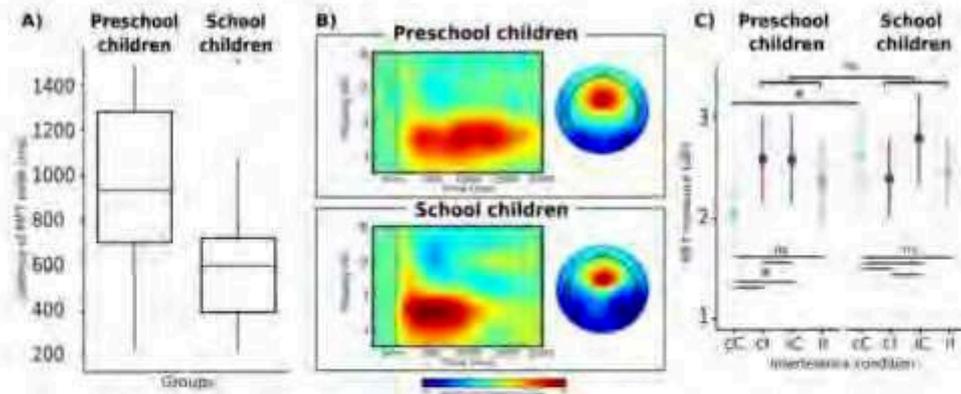


Figure 4 A) Boxplot of the mean latency of the MFT peak showing an earlier peak in school compared to Preschool children, B) Time frequency plot showing the mean Mid Frontal Theta (MFT) power, calculated over all interference conditions for Preschool and School children with associated topographical MFT power distribution (the white spot indicates the FCz location), C) Mean Mid Frontal Theta power for each interference condition in Preschool and School children (the bar indicates the 95 % confidence interval).

3.2.3 Relation between RTs and theta power

Examining the relation between children's MFT Power and response times we found that variations in response time were not explained by variations in MFT in any of the conditions (see the table in the supplemental materials for all statistics). However, we noticed that for Preschool children there was a near significant difference between the regression slope of the null interference condition and that of the response interference condition (Power \times it : $\beta = -0.027 [-0.056, 0.002]$, $t = -1.821$, $p = .069$).

Discussion

Mid-frontal theta has been proposed to serve as a mechanism used for implementing cognitive control in different contexts (Cavanagh et al., 2009; Cavanagh & Frank, 2014; Cohen & Cavanagh, 2011). In particular, mid-frontal theta is involved in the resolution of different types of interference occurring at distinct processing stages (Nigbur et al., 2011). Yet it is not known whether such a mechanism plays a general role in the development of cognitive control. Here we show involvement of mid-frontal theta in different interference situations in both school and preschool children, suggesting a role for mid-frontal theta in the development of different cognitive control processes.

The resolution of interference involves different cognitive sub-processes like conflict detection (between task-sets or response alternatives), signaling or monitoring of the need for cognitive control, selection and preparation of the correct response and inhibition of the incorrect one. Mid-frontal theta band activity is known to be involved in both conflict detection and resolution processes (Cavanagh et al., 2012; Cohen & Cavanagh, 2011). However, the uncertainty about the timing of such sub-processes (Huster, Enriquez-Geppert, Lavalée, Falkenstein, & Herrmann, 2013; Kropotov, Pomonarev, Holzap, & Mueller, 2011) as well as the selection, in the present study, of an extended time window for the detection of the mid-frontal theta peak, prevent us from unequivocally associate mid-frontal theta power to some specific sub-processes of cognitive control. In the following discussion, we, therefore, interpret mid-frontal theta power as a generic indicator of cognitive control implementation.

Mid-frontal theta was increased in all the interference conditions compared to the baseline in both Preschool and School children. Consistent with previous findings in adults showing enhanced theta power during

interference trials in a Simon task (Cohen & Donner, 2013; Nigbur et al., 2011) and a Stroop task (Hanslmayr et al., 2008), mid-frontal theta power was increased in the interference condition involving a conflict between the response alternatives elicited by the irrelevant dimension of the stimulus (the spatial location of the stimulus) and the relevant dimension of the stimulus (the shape of the stimulus). Mid-frontal theta power was also enhanced when the interference occurred at the task-set level. This result is consistent with the observation of theta power changes during switch tasks in adults (Cunillera et al., 2012; Sauseng et al., 2006). To the best of our knowledge, the present study is the first to show that mid-frontal theta is also involved in the resolution of interference at the task-set level during development. These results extend previous results showing a link between frontal theta and cognitive control processes in preschool children (Bell & Wolfe, 2007) and in infants (Bazhenova, Stroganova, Doussard-Roosevelt, Posikera, & Porges, 2006; Orekhova et al., 1999) by further showing its involvement in the development of different cognitive control processes as early as the preschool ages.

The structure of cognitive control is known to change over development, because of an increased functional specialization of brain systems that are originally relatively undifferentiated (Johnson & Munakata, 2005). This change occurs with respect to the degree of unity and independence of the executive functions with a stability of these functions, with well-differentiated working memory, shifting and inhibitory processes, occurring at the ages of 6-8 years (Huizinga, Dolan, & van der Molen, 2006; Lehto et al., 2003). Of particular relevance to the present study is the observation that executive functions are less differentiated in preschool-age children compared with school-age children (Hughes & Ensor, 2011). Yet, in the present study mid-frontal theta power was increased during the engagement of cognitive control in both preschool and school groups that present differences in the degree of differentiation of executive function. This suggests that mid-frontal theta is involved in the development of cognitive control irrespective of the structure of cognitive control (e.g. of the degree of differentiation of its functions).

Consistent with previous findings we observed age differences in mid-frontal theta latency, with school children engaging theta oscillation more rapidly than preschool children. Faster latencies were indeed observed for some event related components in adolescents and adults compared to preschool and school children. In inhibition tasks, faster latencies were observed for both the N200 component (Lamm et al., 2006a), which reflects conflict monitoring (Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter, & Cohen, 1999) and in particular the detection of an interference and the need of cognitive control (Hämmerer, Müller, & Li, 2014; Nieuwenhuis, Yeung, Den Wildenberg, & Ridderinkhof, 2003) as well as the P300 component (Davis, Bruce, Snyder, & Nelson, 2003; Ridderinkhof & van der Molen, 1995). Faster brain responses may result from brain structural changes occurring during childhood, like axonal myelination or pruning, resulting in enhanced connectivity and faster neural communication for more mature children (Brown & Jernigan, 2012) as well as more developed connections of the brain networks supporting cognitive control (Gogtay et al., 2004; Hämmerer et al., 2014; Hwang, Velanova, & Luna, 2010; Sowell et al., 2003). Faster neural communication allows to increase the speed of information processing and explains age-related improvements in cognitive control. Consistent with this interpretation we found faster response times in school children as well as positive correlations between mid-frontal theta latencies and response times in both groups. These results suggest that children's improved performance as reflected by faster response times were explained by a faster implementation of mid-frontal theta oscillatory activity.

Contrary to mid-frontal theta latency, we did not observe any differences in mid-frontal theta power between preschool and school children, neither globally nor with respect to the type of interference condition. At first sight this result seems contradictory with the observation that the development of cognitive control is accompanied by increased activity in mid-frontal areas as reported with EEG studies (Bell & Wolfe, 2007; Liu et al., 2014) as well as fMRI studies in the anterior cingulate cortex and the medial prefrontal cortex (Ordaz, Foran, Velanova, & Luna, 2013; Rubia, Smith, Taylor, & Brammer, 2007) and the inferior prefrontal cortex (Rubia et al., 2007; Tamm, Menon, & Reiss, 2002). However, age-related decreases in brain activity within the frontal areas have also been reported with inhibition tasks (Booth et al., 2003; Tamm et al., 2002). Therefore, this literature shows that there is no clear understanding of the changes in brain activity related to the development of cognitive control. Furthermore, to the best of our knowledge, no study has assessed these changes in children aged four to eight years old. It is therefore unknown whether brain activity related to

Theta in cognitive control development

cognitive control shows any substantial changes over this age range. The absence of any differences in mid-frontal theta power between preschool and school children could also be explained by the very small age difference between our two groups (four to six years old and six to eight years old) that might not have been enough to observe some changes in the activity of these brain networks.

The level of mid-frontal theta power reflects the engagement of cognitive control with greater power associated with greater cognitive control demands (Cavanagh & Shackman, 2015; Hanslmayr et al., 2008; Wascher et al., 2014). Mid-frontal theta power was indeed enhanced in some conditions of interference that engaged more cognitive control. In particular, MFT power increased relative to the null interference condition when preschool children were engaged in the resolution of a task-set interference. Resolving an interference at the task set level is indeed very costly in terms of cognitive control resources as shown by slower and less accurate responses compared to all other conditions in both preschool and school children. This finding is consistent with developmental studies showing that the lower performance is obtained with set-shifting tasks and that this capacity presents the longer developmental changes with respect to other executive functions (Davidson et al., 2006). However, the resolution of a repeated response interference did not elicit increased theta power in preschool children. Furthermore, preschool children were equally accurate in this condition than in the null interference condition and their fastest response times were associated with enhanced theta power compared to the null interference condition. These findings can be interpreted in terms of a facilitator repetition effect in which the activation of cognitive control for the resolution of the interference in the preceding trial is maintained activated over the subsequent trial. It has indeed been shown that preschool children have already the ability to anticipate cognitive control (Ambrosi, Lemaire, & Blaye, 2016; Iani, Stella, & Rubichi, 2014).

In school children, theta power was maintained equal in all conditions with or without interference. These results partly diverge from previous findings in adults showing enhanced theta power consecutively to interference generated by the incompatibility between task-relevant and -irrelevant dimensions in both a Simon task (Cohen & Donner, 2013; Nigbur et al., 2011) and a Stroop task (Hanslmayr et al., 2008). The absence of modulation of theta power across conditions, and in particular between the conditions involving interference and the condition without any interference, could suggest that school children equally engaged cognitive control across all the conditions, even in the condition with no interference that entailed low cognitive control demands. We indeed observed that theta power was higher in the null interference condition in school children compared to preschool children. School children's engagement of cognitive control throughout the present task can be explained by the mixed nature of the task where trials with different types of interference were randomly mixed, eliciting important uncertainty about the upcoming trial with respect to the presence of interference at the task-set and/or the response-tendency level. Increased theta power was indeed found to be linked to the need of dynamical adjustments of cognitive control in mixed tasks (van de Vijver et al., 2011; Womelsdorf et al., 2010).

The development of cognitive control is accompanied by improvements in executive functions like cognitive flexibility and inhibition that present some differences in their developmental time courses, partly due to differences in the maturational changes of their respective parieto-prefrontal networks (Bunge & Zelazo, 2006). However, despite these differences, we propose that mid-frontal theta may serve as a general mechanism in the development of these functions by enabling better coordination of the cognitive processes within these brain networks. Future studies on the role of mid-frontal theta in the development of cognitive control would need to better characterize the developmental trajectories of the sub-processes related to either the detection of the conflict or of its resolution. The present study also shows the importance of comparing neurodevelopmental changes associated with different implementations of cognitive control in order to better characterize their respective changes over development. These findings could have important implications in the field of cognitive interventions (Ursaché, Blair, & Raver, 2012) in children by helping to better understand the effects of such interventions on the development of the brain networks supporting cognitive control.

4 References

- Ambrosi, S., Lemaire, P., & Blaye, A. (2016). Do young children modulate their cognitive control?: Sequential congruency effects across three conflict tasks in 5-to-6 year-olds. *Experimental Psychology*, *63*(2), 117–126. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000320>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *JSS Journal of Statistical Software*, *67*(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bazhenova, O. V., Stroganova, T. A., Doussard-Roosevelt, J. A., Posikera, I. A., & Porges, S. W. (2007). Physiological responses of 5-month-old infants to smiling and blank faces. *International Journal of Psychophysiology*, *63*(1), 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2006.08.008>
- Bell, M. A. (2002). Power changes in infant EEG frequency bands during a spatial working memory task. *Psychophysiology*, *39*(4), 450–458. <https://doi.org/10.1017/S0048577201393174>
- Bell, M. A., & Cuevas, K. (2012). Using EEG to Study Cognitive Development: Issues and Practices. *Journal of Cognition and Development*. <https://doi.org/10.1080/15248372.2012.691143>
- Bell, M. A., & Wolfe, C. D. (2007). Changes in brain functioning from infancy to early childhood: evidence from EEG power and coherence working memory tasks. *Developmental Neuropsychology*, *31*(1), 21–38. https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101_2
- Best, J. R., Miller, P. H., & Jones, L. L. (2009). Executive functions after age 5: Changes and correlates. *Developmental Review*. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2009.05.002>
- Blaye, A., & Chevalier, N. (2011). The role of goal representation in preschoolers' flexibility and inhibition. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(3), 469–483. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.006>
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Lei, Z., Trommer, B. L., Davenport, N. D., ... Mesulam, M. M. (2003). Neural development of selective attention and response inhibition. *NeuroImage*, *20*(2), 737–751. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00404-X](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00404-X)
- Bosseler, A. N., Taulu, S., Pihko, E., Mäkelä, J. P., Imada, T., Ahonen, A., & Kuhl, P. K. (2013). Theta brain rhythms index perceptual narrowing in infant speech perception. *Frontiers in Psychology*, *4*(October), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00690>
- Botvinick, M., Nystrom, L. E., Fissell, K., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (1999). Conflict monitoring versus selection for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, *402*(6758), 179–181. <https://doi.org/10.1038/46035>
- Brown, T. T., & Jernigan, T. L. (2012). Brain development during the preschool years. *Neuropsychology Review*. <https://doi.org/10.1007/s11065-012-9214-1>
- Bunge, S. A., & Wright, S. B. (2007). Neurodevelopmental changes in working memory and cognitive control. *Current Opinion in Neurobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.02.005>
- Bunge, S. A., & Zelazo, P. D. (2006). A Brain-Based Account of the Development of Rule Use in Childhood. *Current Directions in Psychological Science*, *15*(3), 118–121.
- Buzsaki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal Oscillations in Cortical Networks. *Science*, *304*(5679), 1926–1938. Retrieved from <http://science.sciencemag.org/>
- Calderon, J., Jambaqué, I., Bonnet, D., & Angeard, N. (2014). Executive functions development in 5- to 7-year-

- old children with transposition of the great arteries: Longitudinal study. *Developmental Neuropsychology*, 39(5), 365–384. <https://doi.org/10.1080/87565641.2014.916709>
- Cao, J., Wang, S., Ren, Y., Zhang, Y., Cai, J., Tu, W., ... Xia, Y. (2013). Interference control in 6-11 year-old children with and without ADHD: Behavioral and ERP study. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 31(5), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2013.04.005>
- Casey, B. J., Davidson, M. C., Hara, Y., Thomas, K. M., Martinez, A., Galvan, A., ... Tottenham, N. (2004). Early development of subcortical regions involved in non-cued attention switching. *Developmental Science*, 7(5), 534–542. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2004.00377.x>
- Cavanagh, J. F., Cohen, M. X., & Allen, J. J. B. (2009). Prelude to and Resolution of an Error: EEG Phase Synchrony Reveals Cognitive Control Dynamics during Action Monitoring. *Journal of Neuroscience*, 29(1), 98–105. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4137-08.2009>
- Cavanagh, James F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Cavanagh, James F., & Shackman, A. J. (2015). Frontal midline theta reflects anxiety and cognitive control: Meta-analytic evidence. *Journal of Physiology Paris*, 109(1–3), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2014.04.003>
- Cavanagh, James F., Zambrano-Vazquez, L., & Allen, J. J. B. (2012). Theta lingua franca: A common mid-frontal substrate for action monitoring processes. *Psychophysiology*, 49(2), 220–238. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01293.x>
- Chaumon, M., Bishop, D. V. M., & Busch, N. A. (2015). A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. *Journal of Neuroscience Methods*, 250, 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.02.025>
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2008). Cognitive flexibility in preschoolers: The role of representation activation and maintenance: Paper. *Developmental Science*, 11(3), 339–353. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00679.x>
- Cheveigné, A. De, & Arzoumanian, D. (2015). Scanning for oscillations. *Journal of Neural Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.1088/1741-2560/12/6/066020>
- Cohen, Mike X. (2014). A neural microcircuit for cognitive conflict detection and signaling. *Trends in Neurosciences*, 37(9), 480–490. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.06.004>
- Cohen, Mike X. (2017). Comparison of linear spatial filters for identifying oscillatory activity in multichannel data. *Journal of Neuroscience Methods*, 278, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2016.12.016>
- Cohen, Mike X. (2019). A better way to define and describe Morlet wavelets for time-frequency analysis. *NeuroImage*, 199, 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.048>
- Cohen, Mike X., & Cavanagh, J. F. (2011). Single-trial regression elucidates the role of prefrontal theta oscillations in response conflict. *Frontiers in Psychology*, 2(FEB). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00030>
- Cohen, Mike X., & Gulbinaite, R. (2017). Rhythmic entrainment source separation: Optimizing analyses of neural responses to rhythmic sensory stimulation. *NeuroImage*, 147(November 2016), 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.036>

- Cohen, Mike X., & Ridderinkhof, K. R. (2013). EEG Source Reconstruction Reveals Frontal-Parietal Dynamics of Spatial Conflict Processing. *PLoS ONE*, *8*(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057293>
- Cohen, Mike X., & Donner, T. H. (2013a). Midfrontal conflict-related theta-band power reflects neural oscillations that predict behavior. *Journal of Neurophysiology*, *110*(12), 2752–2763. <https://doi.org/10.1152/jn.00479.2013>
- Cohen, Mike X., & Donner, T. H. (2013b). Midfrontal conflict-related theta-band power reflects neural oscillations that predict behavior. *Journal of Neurophysiology*, *110*(12), 2752–2763. <https://doi.org/10.1152/jn.00479.2013>
- Cohen, Mike X. (2014). *Analyzing neural time series data: theory and practice*. MIT press.
- Conejero, Á., Guerra, S., Abundis-Gutiérrez, A., & Rueda, M. R. (2018). Frontal theta activation associated with error detection in toddlers: influence of familial socioeconomic status. *Developmental Science*, *21*(1). <https://doi.org/10.1111/desc.12494>
- Crone, E. A., Bunge, S. A., Van Der Molen, M. W., & Richard Ridderinkhof, K. (2006). Switching between tasks and responses: A developmental study. *Developmental Science*, *9*(3), 278–287. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00490.x>
- Crone, E. A., & Steinbeis, N. (2017). Neural Perspectives on Cognitive Control Development during Childhood and Adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, *21*(3), 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.01.003>
- Cumillera, T., Fuentemilla, L., Periañez, J., Marco-Pallarès, J., Krämer, U. M., Cámara, E., ... Antoni, R. F. (2012). Brain oscillatory activity associated with task switching and feedback processing. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *12*(1), 16–33. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0075-5>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- Davis, E. P., Bruce, J., Snyder, K., & Nelson, C. A. (2003). The X-Trials: Neural Correlates of an Inhibitory Control Task in Children and Adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(3), 432–443.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, *134*(1), 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Diamond, A., Steven Barnett, W., Thomas, J., & Mumro, S. (2007). Preschool Program Improves Cognitive Control NIH Public Access. *Science*, *318*(5855), 1387–1388. Retrieved from www.sciencemag.org/cgi/content/full/318/5855/1387/DC1
- Doesburg, S. M., Vidal, J., & Taylor, M. J. (2013). Reduced Theta Connectivity during Set-Shifting in Children with Autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*(November), 785. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00785>
- Duprez, J., Gulbinaite, R., & Cohen, M. X. (2018). Midfrontal theta phase coordinates behaviorally relevant

- brain computations during response conflict. *BioRxiv*, 502716. <https://doi.org/10.1101/502716>
- Ezekiel, F., Bosma, R., & Morton, J. B. (2013). Dimensional Change Card Sort performance associated with age-related differences in functional connectivity of lateral prefrontal cortex. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 5, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.12.001>
- Fox, N. A., Henderson, H. A., Rubin, K. H., Calkins, S. D., & Schmidt, L. A. (2001). Continuity and discontinuity of behavioral inhibition and exuberance: Psychophysiological and behavioral influences across the first four years of life. *Child Development*, 72(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00262>
- Gogtay, N., Nugent, T. F., Thompson, P. M., Hayashi, K. M., Giedd, J. N., 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*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Gulbinaite, R., & Johnson, A. (2014). Working memory capacity predicts conflict-task performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, 67(7), 1383–1400. <https://doi.org/10.1080/17470218.2013.863374>
- Gulbinaite, R., van Rijn, H., & Cohen, M. X. (2014). Fronto-parietal network oscillations reveal relationship between working memory capacity and cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00761>
- Gulbinaite, R., van Viegen, T., Wieling, M., Cohen, M. X., & VanRullen, R. (2017). Individual Alpha Peak Frequency Predicts 10 Hz Flicker Effects on Selective Attention. *The Journal of Neuroscience*, 37(42), 10173–10184. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1163-17.2017>
- Hämmerer, D., Müller, V., & Li, S. C. (2014). Performance monitoring across the lifespan: Still maturing post-conflict regulation in children and declining task-set monitoring in older adults. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.06.008>
- Hanslmayr, S., Pastötter, B., Bäuml, K. H., Gruber, S., Wimber, M., & Klimesch, W. (2008). The electrophysiological dynamics of interference during the stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(2), 215–225. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20020>
- Hughes, C., & Ensor, R. (2011). Individual differences in growth in executive function across the transition to school predict externalizing and internalizing behaviors and self-perceived academic success at 6 years of age. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 663–676. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.06.005>
- Huizinga, M., Dolan, C. V., & van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017–2036. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010>
- Huizinga, M., & van der Molen, M. W. (2011). Task switching and shifting between stopping and going: Developmental change in between-trial control adjustments. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 484–503. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.10.004>
- Huster, R. J., Enriquez-Geppert, S., Lavalée, C. F., Falkenstein, M., & Herrmann, C. S. (2013). Electroencephalography of response inhibition tasks: Functional networks and cognitive contributions. *International Journal of Psychophysiology*, 87(3), 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.001>
- Hwang, K., Velanova, K., & Luna, B. (2010). Strengthening of Top-Down Frontal Cognitive Control Networks

- Underlying the Development of Inhibitory Control: A Functional Magnetic Resonance Imaging Effective Connectivity Study. *Journal of Neuroscience*, 30(46), 15535–15545. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2825-10.2010>
- Iani, C., Stella, G., & Rubichi, S. (2014). Response inhibition and adaptations to response conflict in 6- to 8-year-old children: Evidence from the Simon effect. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 76(4), 1234–1241. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0656-9>
- Jensen, O., & Tesche, C. D. (2002). Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *European Journal of Neuroscience*, 15(8), 1395–1399. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x>
- Johnson, M. H., & Mumukata, Y. (2005). Processes of change in brain and cognitive development. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 9, pp. 152–158). <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.009>
- Kayser, J., & Tenke, C. E. (2015). On the benefits of using surface Laplacian (current source density) methodology in electrophysiology. *International Journal of Psychophysiology*, 97(3), 171–173. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.06.001>
- Kray, J., Gaspard, H., Karbach, J., & Blaye, A. (2013). Developmental changes in using verbal self-cueing in task-switching situations: The impact of task practice and task-sequencing demands. *Frontiers in Psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00940>
- Kropotov, J. D., Ponomarev, V. A., Hollup, S., & Mueller, A. (2011). Dissociating action inhibition, conflict monitoring and sensory mismatch into independent components of event related potentials in GO/NOGO task. *NeuroImage*, 57(2), 565–575. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.04.060>
- Lamm, C., Zelazo, P. D., & Lewis, M. D. (2006a). Neural correlates of cognitive control in childhood and adolescence: Disentangling the contributions of age and executive function. *Neuropsychologia*, 44(11), 2139–2148. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.10.013>
- Lamm, C., Zelazo, P. D., & Lewis, M. D. (2006b). Neural correlates of cognitive control in childhood and adolescence: Disentangling the contributions of age and executive function. *Neuropsychologia*, 44(11), 2139–2148. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.10.013>
- Lehto, J. E., Junjärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59–80. <https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Liu, Z. X., Woltering, S., & Lewis, M. D. (2014). Developmental change in EEG theta activity in the medial prefrontal cortex during response control. *NeuroImage*, 85, 873–887. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.054>
- Lucenet, J., & Blaye, A. (2014). Age-related changes in the temporal dynamics of executive control: a study in 5- and 6-year-old children. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00831>
- Meiran, N. (1996). Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 23(6), 1423–1442. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.22.6.1423>
- Meyer, M., Endeldijk, H. M., van Ede, F., & Hummies, S. (2019). Theta oscillations in 4-year-olds are sensitive to task engagement and task demands. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42615-x>

- Michel, C., Stets, M., Parise, E., Reid, V. M., Striano, T., & Hoehl, S. (2015). Theta- and alpha-band EEG activity in response to eye gaze cues in early infancy. *NeuroImage*, *118*, 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.06.042>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An Integrative Theory of Prefrontal Cortex Function. *Annual Review of Neuroscience*, *24*(1), 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Miller, M. R., Giesbrecht, G. F., Müller, U., McInerney, R. J., & Kerns, K. A. (2012). A Latent Variable Approach to Determining the Structure of Executive Function in Preschool Children. *Journal of Cognition and Development*, *13*(3), 395–423. <https://doi.org/10.1080/15248372.2011.585478>
- Miller, M. R., Müller, U., Giesbrecht, G. F., Carpendale, J. I., & Kerns, K. A. (2013). The contribution of executive function and social understanding to preschoolers' letter and math skills. *Cognitive Development*, *28*(4), 331–349. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.10.005>
- 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. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(3), 134–140. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Morasch, K. C., & Bell, M. A. (2011). The role of inhibitory control in behavioral and physiological expressions of toddler executive function. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(3), 593–606. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.07.003>
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Den Wildenberg, W., & Ridderinkhof, K. R. (2003). Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a go/no-go task. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *3*(1), 17–26.
- Nigbur, R., Cohen, M. X., Ridderinkhof, K. R., & Stürmer, B. (2012). Theta Dynamics Reveal Domain-specific Control over Stimulus and Response Conflict. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(5), 1264–1274.
- Nigbur, R., Ivanova, G., & Stürmer, B. (2011). Theta power as a marker for cognitive interference. *Clinical Neurophysiology*, *122*(11), 2185–2194. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.03.030>
- Nikulin, V. V., Nolte, G., & Curio, G. (2011). A novel method for reliable and fast extraction of neuronal EEG/MEG oscillations on the basis of spatio-spectral decomposition. *NeuroImage*, *53*(4), 1528–1535. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.057>
- O'leary, M. J., & Barber, P. J. (1994). *Stimulus congruence and the Simon effect*. *Psychol Res* (Vol. 56).
- Obradović, J., Sulik, M. J., Finch, J. E., & Tirado-Strayer, N. (2018). Assessing students' executive functions in the classroom: Validating a scalable group-based procedure. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *55*, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2017.03.003>
- Ordaz, S. J., Foran, W., Velanova, K., & Luna, B. (2013). Longitudinal Growth Curves of Brain Function Underlying Inhibitory Control through Adolescence. *Journal of Neuroscience*, *33*(46), 18109–18124. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1741-13.2013>
- Orekhova, E. V., Stroganova, T. A., Posikera, I. N., & Elam, M. (2006). EEG theta rhythm in infants and preschool children. *Clinical Neurophysiology*, *117*(5), 1047–1062. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.12.027>

- Orekhova, Elena V., Stroganova, T. A., & Posikera, I. N. (1999). Theta synchronization during sustained anticipatory attention in infants over the second half of the first year of life. *International Journal of Psychophysiology*, *33*(2), 151–172. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(99\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(99)00011-2)
- Papenberg, G., Hämmerer, D., Müller, V., Lindenberger, U., & Li, S. C. (2013). Lower theta inter-trial phase coherence during performance monitoring is related to higher reaction time variability: A lifespan study. *NeuroImage*, *83*, 912–920. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.07.032>
- Richardson, C., Anderson, M., Reid, C. L., & Fox, A. M. (2018). Development of inhibition and switching: A longitudinal study of the maturation of interference suppression and reversal processes during childhood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *34*, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.03.002>
- Ridderinkhof, K. R., & van der Molen, M. W. (1995). A Psychophysiological Analysis of Developmental Differences in the Ability to Resist Interference. *Child Development*, *66*(4), 1040–1056. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1995.tb00921.x>
- Rubia, K., Smith, A. B., Taylor, E., & Brammer, M. (2007). Linear age-correlated functional development of right inferior fronto-striato-cerebellar networks during response inhibition and anterior cingulate during error-related processes. *Human Brain Mapping*, *28*(11), 1163–1177. <https://doi.org/10.1002/hbm.20347>
- Sauseng, P., Klimesch, W., Freunberger, R., Pecherstorfer, T., Hanslmayr, S., & Doppelmayr, M. (2006). Relevance of EEG alpha and theta oscillations during task switching. *Experimental Brain Research*, *170*(3), 295–301. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0211-y>
- Senn, T. E., Espy, K. A., & Kaufmann, P. M. (2004). Using path analysis to understand executive function organization in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, *26*(1), 445–464. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_5
- Sheridan, M., Kharitonova, M., Martin, R. E., Chatterjee, A., & Gabrieli, J. D. E. (2014). Neural Substrates of the Development of Cognitive Control in Children Ages 5-10 Years. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*(8), 1840–1850. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00597
- Simon, J. R., & Berbaum, K. (1988). Effect of irrelevant information on retrieval time for relevant information. *Acta Psychologica*, *67*(1), 33–57. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(88\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(88)90023-6)
- Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience*, *6*(3), 309–315. <https://doi.org/10.1038/nm1008>
- 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. <https://doi.org/10.1080/17470210500162854>
- Tamm, L., Menon, V., & Reiss, A. L. (2002). Maturation of Brain Function Associated With Response Inhibition. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, *41*(10), 1231–1238. <https://doi.org/10.1097/01.CHL.0000020272.43550.5E>
- Töllner, T., Wang, Y., Makeig, S., Müller, H. J., Jung, T.-P., & Gramann, K. (2017). Two Independent Frontal Midline Theta Oscillations during Conflict Detection and Adaptation in a Simon-Type Manual Reaching Task. *The Journal of Neuroscience*, *37*(9), 2504–2515. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1752-16.2017>
- Ursache, A., Blair, C., & Raver, C. C. (2012). The Promotion of Self-Regulation as a Means of Enhancing School Readiness and Early Achievement in Children at Risk for School Failure. *Child Development Perspectives*. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00209.x>

- van de Vijver, I., Richard Ridderinkhof, K., & Cohen, M. X. (2011). Frontal oscillatory dynamics predict feedback learning and action adjustment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(12), 4106–4121. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00110
- Von Stein, A., & Sarnthein, J. (2000). Different frequencies for different scales of cortical integration: From local gamma to long range alpha/theta synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, 38(3), 301–313. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00172-0)
- Wascher, E., Rasch, B., Sanger, J., Hoffmann, S., Schneider, D., Rinkebaumer, G., ... Gutberlet, I. (2014). Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. *Biological Psychology*, 96(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.010>
- Watson, A. J., & Bell, M. A. (2013). Individual differences in inhibitory control skills at three years of age. *Developmental Neuropsychology*, 38(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/87565641.2012.718818>
- Wendelken, C., Munakata, Y., Baym, C., Souza, M., & Bunge, S. A. (2012). Flexible rule use: Common neural substrates in children and adults. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 3(3), 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.02.001>
- 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. <https://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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008>
- Wolfe, C. D., & Bell, M. A. (2004). Working Memory and Inhibitory Control in Early Childhood: Contributions from Physiology, Temperament, and Language. *Developmental Psychobiology*, 44(1), 68–83. <https://doi.org/10.1002/dev.10152>
- Wolfe, C. D., & Bell, M. A. (2007). The integration of cognition and emotion during infancy and early childhood: Regulatory processes associated with the development of working memory. *Brain and Cognition*, 65(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.01.009>
- Womelsdorf, T., Johnston, K., Vinck, M., & Everling, S. (2010). Theta-activity in anterior cingulate cortex predicts task rules and their adjustments following errors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(11), 5248–5253. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906194107>
- Zelazo, P., & Jacques, S. (1997). Children's rule use: Representation, reflection, and cognitive control. *Annals of Child Development*, 12, 119–176. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/284649375>

5 Supplementary material

Additional methodological information

Time-frequency decomposition was performed by convolving stimulus-locked single-trial data from all electrodes with complex Morlet wavelets:

$$e^{i2\pi ft} e^{-t^2/(2\sigma^2)},$$

Theta in cognitive control development

where t is time, f is frequency, which increased from 2 to 40 Hz in 40 logarithmically spaced steps, and σ defines the width of each frequency band set according to $n/(2\pi f)$, where n is a number of wavelet cycles that varied from 3 to 6 in logarithmically spaced steps.

From the resulting complex signal, an estimate of frequency band-specific power at each time point was defined as the squared magnitude of the result of the convolution:

$$Z = (\text{real}[z(t)]^2 + \text{imag}[z(t)]^2)$$

Single-trial power values were then averaged across trials for each condition separately, and then normalized relative to the condition-average baseline period (-400 to -100 ms) using a decibel (dB) transform at each frequency:

$$\text{dB power} = 10 \times \log_{10}[\text{power}/\text{baseline}]$$

For each participant, we identified a single MFT component using the following steps. First, single-trial data were filtered in the theta band using a narrow-band Gaussian filter (peak 6 Hz, full-width at half-maximum (FWHM) = 3 Hz). Second, for each participant temporally filtered single-trial data was used to compute the covariance matrix \mathbf{S} ("signal" matrix) and broadband unfiltered data was used to compute the covariance matrix \mathbf{R} ("reference" matrix). Third, generalized eigenvalue decomposition was performed on the covariance matrices \mathbf{S} and \mathbf{R} (MATLAB function *eig*) to obtain a set of vectors or spatial filters (\mathbf{W}), which maximally separate matrix \mathbf{S} from matrix \mathbf{R} :

$$\mathbf{S}\mathbf{W} = \mathbf{R}\mathbf{W}\mathbf{\Lambda}$$

where \mathbf{W} is the matrix of eigenvectors and $\mathbf{\Lambda}$ is a diagonal matrix of eigenvalues.

The first 6 vectors (spatial filters) associated with the highest eigenvalues (diagonal elements in matrix $\mathbf{\Lambda}$) were applied to unfiltered data resulting in 6 component time series. Topographical representation of the spatial filters (activation patterns; (Haufe et al., 2014)) and time-frequency representation of trial-average component time series were visually inspected and a single component was identified per participant.

We identified individual theta power peak in the condition-averaged data within the window 200 to 1500 ms, then a smaller participant specific window was determined around the peak frequency (± 1 Hz) and time (± 150 ms). The theta power within this specific window was average for each condition to compute the individual mid frontal theta power (MFT). See figure S1 for visualization of the procedure on a single participant.

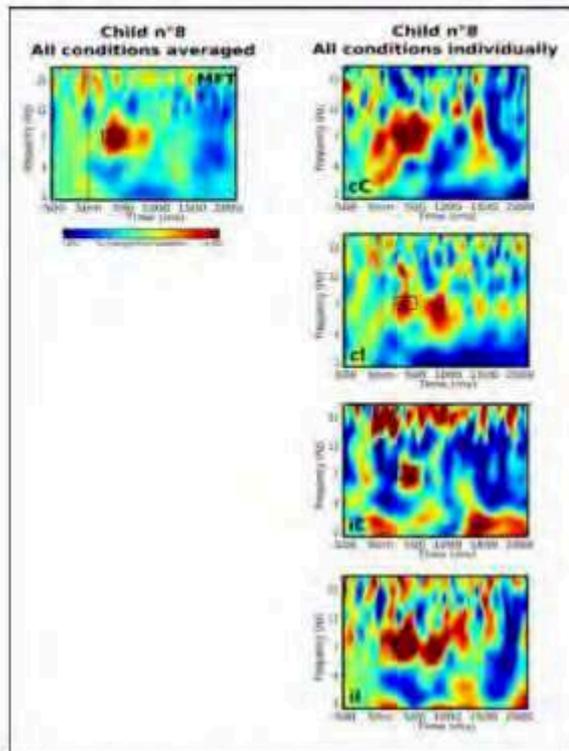


Figure S1; On the left, Spatio frequency representation of the baseline corrected MFT component power amplitude for the condition averaged data of one randomly selected participant. The black star show the peak in amplitude within the theta range window between 200 and 1500ms. The black rectangle show the extended window that correspond to the peak ± 1 Hz and ± 150 ms. On the right, the previously determinate window is used to extract the condition specific MFT theta power. The activity in the window is averaged to obtain a single measure of MFT power amplitude by condition by participant.

Parameter	Residual time			Accuracy			Response time			MFT power								
	B	CI	Problem	B	CI	Problem	B	CI	Problem	B	CI	Problem						
Intercept	17.017	[16.977, 17.056]	100.000	0.000	[-0.001, 0.001]	2.496	[2.474, 2.518]	18.317	[-0.003, 18.317]	7.862	[8.896, 11.142]	13.046	[-0.001, 13.046]	1.817	[1.817, 1.817]	101.213	[-0.001, 101.213]	
Group	-0.153	[-0.424, 0.118]	-0.521	[-0.001, 0.796]	0.724	[0.274, 1.183]	1.796	[-0.009, 3.509]	-0.153	[-0.521, 0.215]	-0.153	[-0.521, 0.215]	-0.153	[-0.521, 0.215]	0.515	[-0.111, 0.221]	2.441	[-0.001, 2.441]
Age	0.114	[0.074, 0.154]	0.575	[-0.001, 0.945]	-0.845	[-0.915, -0.774]	-4.200	[-0.001, -8.399]	3.715	[2.502, 4.928]	4.247	[-0.001, 8.493]	4.247	[-0.001, 8.493]	0.146	[-0.111, 0.302]	0.448	[-0.001, 0.448]
Sex	0.086	[-0.041, 0.211]	0.811	[-0.001, 0.965]	-0.865	[-0.815, -0.915]	-4.319	[-0.001, -8.637]	2.448	[2.113, 2.783]	4.802	[-0.001, 9.603]	4.802	[-0.001, 9.603]	0.111	[-0.111, 0.332]	1.197	[-0.001, 1.197]
Group x Age	-0.001	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	-0.001	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]
Group x Sex	-0.001	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]
Group x Age x Sex	-0.001	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]	0.000	[-0.001, 0.001]
MFT power: CI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MFT power: CI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MFT power: CI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MFT power: Group	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MFT power: Group x Age	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MFT power: Group x Sex	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MFT power: Group x Age x Sex	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fixed effects																		
Intercept	147.0	[147.0, 147.0]	1.000	[1.000, 1.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Age	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Age	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Age x Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Random effects																		
Intercept	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Age	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Age	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Age x Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Residual	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Age	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Age	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]
Group x Age x Sex	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]	0.000	[0.000, 0.000]

Supplementary tables for models (continued) in model packages ch 8 with description of fixed and random effects as well as parameters of the models.

Appendix B

	GLM							
	Response time**			Latency				
	β	CI	t-value	p-value	β	CI	t-value	p-value
Intercept	6.999	(6.902, 7.096)	141.449	<0.001	6.862	(6.717, 7.008)	92.453	<0.001
Group	-0.267	(-0.398, -0.136)	-4.003	0.0002	-0.487	(-0.697, -0.277)	-4.538	<0.001
ci	-	-	-	-	-	-	-	-
ic	-	-	-	-	-	-	-	-
il	-	-	-	-	-	-	-	-
Group : ci	-	-	-	-	-	-	-	-
Group : ic	-	-	-	-	-	-	-	-
Group : il	-	-	-	-	-	-	-	-
Latency	0.0002	(0.0001, 0.0002)	3.125	0.003	-	-	-	-
Grp : Latency	-0.0001	(-0.0002, 0.0001)	-0.925	0.359	-	-	-	-

N subject	69	69
N obs	69	69
Log Likelihood	-427.057	-497.879
AIC	862.114	999.757
Residual deviance	0.838 (df = 65)	15.240 (df = 67)
Null Deviance	3.302 (df = 68)	19.257 (df = 68)
Model's family	Gamma	Gamma
Link	log	log

Diagnostic tables for GLM models runned on R with description of fixed and parameters of the models

C. ETUDE MICROGÉNÉTIQUE

1. Introduction

Le développement du contrôle cognitif est affecté par des facteurs environnementaux qui peuvent avoir un impact délétère sur le développement du contrôle cognitif (Moriguchi, 2014). Or, dès les premières années d'école, un contrôle cognitif bien développé est nécessaire pour soutenir les apprentissages fondamentaux tels que la lecture ou les mathématiques et plus généralement pour adapter son propre comportement au contexte scolaire (McClelland, Acock, Piccinin, Rhea, & Stallings, 2013; Miyake et al., 2000). Des études ont montré que des interventions précoces ciblant les enfants de ces milieux défavorisés pouvaient réduire, voire éliminer, les différences observées (Bryck & Fisher, 2012; Diamond & Lee, 2011; Klingberg, 2010). Les résultats indiquent une amélioration des performances de différentes fonctions impliquées dans le contrôle cognitif (attention exécutive, flexibilité cognitive, mémoire de travail, inhibition). Les changements d'ordre neuronaux (intensité des ERP, connectivité entre zones cérébrales ou amplitude de rythme oscillatoire comme thêta) observés suite à ces entraînements semblent converger avec les changements relatifs à la maturation neuronale (Espinete et al., 2013; Rueda et al., 2012; Rueda, Posner, et al., 2004)

Le jeu de faire semblant permet une stimulation des trois principales fonctions du contrôle cognitif, des compétences socio-émotionnelles et peut permettre de soutenir les apprentissages scolaires notamment au travers du langage (L. A. Barnett, 1984; Christiano & Russ, 1996; Dansky, 1980; Fisher, 1992; Galyer & Evans, 2001). De solides hypothèses théoriques ainsi que quelques études empiriques attribuent au jeu de faire semblant la capacité de pouvoir soutenir le développement cognitif, en particulier au travers un impact sur les compétences d'autorégulation et de contrôle cognitif. Le jeu de faire semblant a été intégré au sein de plusieurs programmes pédagogiques (Bodrova & Leong, 2006; Natália Martins Dias & Seabra, 2013) ou entraînements du contrôle cognitif (Thibodeau et al., 2016; Traverso et al., 2015). Les activités de jeu de faire semblant semblent pouvoir soutenir le développement du contrôle cognitif et son implémentation dans un large éventail de comportements

d'autorégulation notamment en contexte social. Cependant les preuves d'une plus-value de ces activités, en dehors de toute autre modalité d'intervention, demeurent rares et les résultats des études expérimentales sont largement remis en question (Lillard et al., 2012). De plus, ces résultats ne nous renseignent pas sur le fondement neuronal de ces bénéfices. La présente étude vise à utiliser la même méthode que celle utilisée par Adam et collaborateurs (Adam et al., 2020) pour évaluer d'un point de vue comportemental, cognitif et neuronal, l'effet de 10 semaines d'entraînement du contrôle cognitif basé sur la mise en œuvre de l'autorégulation au cours du jeu social chez des enfants d'âge préscolaire (4 à 6 ans).

2. Matériel & Méthodes

Un effectif de 73 enfants a été recruté sur deux écoles françaises. Une première évaluation a été réalisée au moyen d'une batterie mesurant le contrôle cognitif, les compétences socio-émotionnelles et l'autorégulation (voir nom des tests ci-dessous et se reporter au préambule méthodologique pour une description plus détaillée des tests utilisés).

Evaluations réalisées à l'école par les expérimentateurs

- ❖ Tâche d'interférence - Tâche Cœur-Fleur (HF)
- ❖ Tâche d'autorégulation motrice - Head-to-Toe-Task (H3T)
- ❖ Evaluation du vocabulaire - Peabody (EVIP)
- ❖ Evaluation de l'intelligence fluide - Matrices progressives colorées de Raven (CPM)
- ❖ Evaluation de la maturité du jeu de faire semblant - Grille de cotation Propels (Leong & Bodrova, 2012)

Questionnaires remplis par les parents

- ❖ Evaluation de l'implémentation du contrôle et de ses composantes au quotidien - Behavior rating inventory of executive function (BRIEF)
- ❖ Evaluation des compétences socio-émotionnelles au quotidien - Profil socio affectif (PSA)
- ❖ Questionnaire d'informations générales (QIG)

Les groupes ont été ensuite constitués au moyen d'une méthode de randomisation par paire afin d'équilibrer notre échantillon sur la mesure du contrôle cognitif (HF). En effet, la taille d'échantillon ne s'avère pas compatible avec la mise en œuvre d'une procédure randomisée classique. Une intervention de 11 semaines a ensuite été réalisée, proposant un entraînement écologique du contrôle cognitif basé sur la participation à des sessions en groupe de jeu de faire semblant (à raison de 2 sessions de 45 minutes par semaine). L'intervention contrôle a, quant à elle, mobilisée un effectif d'enfant comparable dans des conditions de durée, de contexte et de fréquence elles aussi comparables. Enfin, une évaluation post-entraînement a été conduite dans des conditions similaires à celles d'avant l'intervention.

Pour construire l'entraînement, nous avons réalisé une revue de la littérature concernant un grand nombre de travaux de recherche ou de revues s'intéressant à l'implémentation d'activités appartenant aux approches stratégiques ou écologiques auprès d'enfants d'âge préscolaire. Ces travaux nous ont permis de préciser d'autant plus les caractéristiques d'intervention principales permettant d'optimiser les éventuels bénéfices sur les compétences de contrôle cognitif et d'autorégulation que pourrait apporter notre entraînement (i.e. rôle de l'expérimentateur, cadrage de la séance de jeu, construction des scénarii). Un tableau en annexe de ce travail regroupe l'ensemble des recommandations synthétisées que nous avons extraites et insérées au sein de notre protocole.

Ce protocole répond aux critères d'essais comparatifs randomisés (protocole ECR) à savoir l'utilisation d'une méthode de randomisation, une évaluation via des mesures pré post et une affectation cachée. Ce dernier critère, qui sous-tend une évaluation aveugle, n'a été que partiellement respecté étant donné la taille de notre échantillon et le nombre limité d'expérimentateurs.

Afin d'obtenir une mesure quant au niveau de vie des ménages interrogés nous avons utilisés un indicateur de l'INSEE (2016) basé sur le revenu par foyer en fonction du nombre de parents (couple vs situation monoparentale) et du nombre d'enfant. Cet indicateur catégorise ainsi le ménage comme situé sous

le seuil de pauvreté, sous les 30% du seuil de pauvreté, autour de la médiane, aisés ou riches.

3. Résultats

Nous résumons dans cette partie les résultats de l'étude microgénétique. Les tableaux et indications statistiques sont reporté.e.s dans l'article ajouté à la fin de ce chapitre.

Un effet principal du temps a été observé pour chaque variable TR, PRC, MFT et latence. Les analyses post-hoc révèlent que ces changements entre les périodes pré et posttest reflètent : i) une diminution du TR ; ii) une augmentation du PRC ; iii) une diminution de la MFT; et iv) une augmentation du pic de MFT. Les mesures de CPM, H3T ainsi que les mesures de la maturité du jeu permettent aussi de constater une amélioration en pré et posttest quel que soit le groupe d'entraînement. La mesure de l'EVIP s'améliore de façon marginale, et les mesures aux questionnaires ne permettent pas d'observer de différence.

Pour ce qui est des bénéfices de l'entraînement, en revanche, seules les mesures de la maturité du jeu permettent d'identifier des différences entre les groupes (illustrées en figure 19). Les enfants du groupe expérimental montrent i) une amélioration des scores de maturité du jeu dans chacune des dimensions évaluées entre avant et après entraînement et ii) des scores de maturité du jeu plus élevé que le groupe contrôle après entraînement. La grille d'évaluation est présentée dans le matériel supplémentaire à la fin de l'article de chapitre.

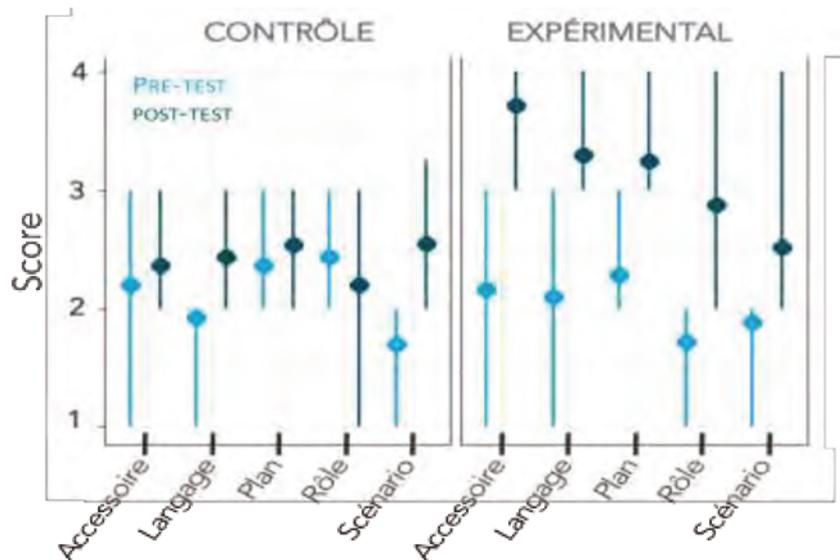


Figure 19. Score de maturité du jeu (sur 5 points) pour chacune des dimensions évaluées en pré et en posttest pour le groupe expérimental et le groupe contrôle. Un score plus élevé est associé à la constatation de comportements plus matures observés lors d'une séance de jeu libre. Cette mesure est issue d'une échelle d'observation en 5 points adaptée de Leong & Bodrova (2007)

Le groupe contrôle a également amélioré la sous-échelle « intégré - isolé » du questionnaire PSA, ainsi que le score global du PSA. Le reste des tests ainsi que les questionnaires ne nous permettent pas d'identifier d'effet au moyen du d de Cohen, la variabilité étant trop élevée.

Pour aller plus loin et étudier d'éventuels effets plus complexes de l'entraînement, nous avons étudié les effets quant à la gestion de conflit liée aux différentes interférences impliquées dans la tâche H&F au moyen de modèles linéaires généraux. Les données cognitives pré –post en fonction du groupe d'entraînement et des conditions d'interférence sont représentées dans la figure 20. Des effets liés à l'interférence sont observés. Toutes les conditions d'interférence sont associées à ralentissement du temps de réponse et les conditions iC et cl à une réduction de la précision. Des comparaisons plus poussées nous permettent de constater que la mesure de la précision permet d'observer des différences entre pré et posttest sur l'amélioration de gestion de conflit en fonction des interférences par rapport à cC. En effet, bien que toutes les performances s'améliorent en posttest, uniquement celles correspondantes aux interférences iC et cl montrent une amélioration significativement différente à celle observée pour la condition d'interférence-nulle entre pré et posttest. En

revanche lorsque l'on regarde cet effet de manière indépendante au sein des deux groupes, on constate qu'il apparaît de manière marginale pour le groupe expérimental qui montre une tendance à progresser entre la précision en pré et post pour les conditions cl et il, mais pas pour le groupe contrôle. Cependant, aucun effet significatif ne ressort quant à la comparaison des deux groupes.

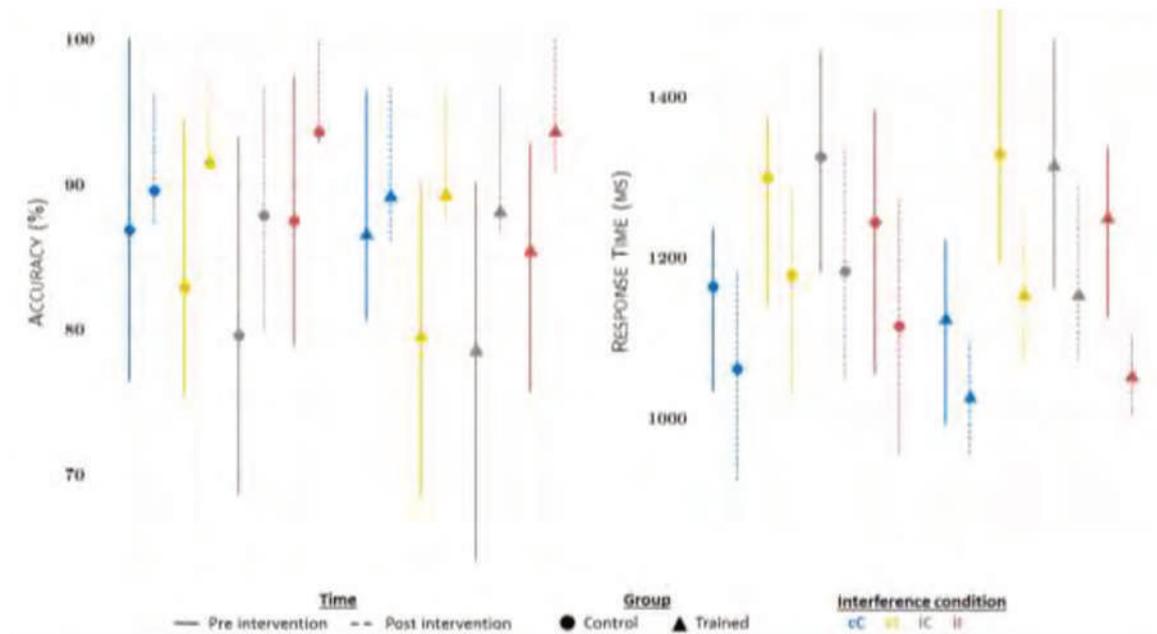


Figure 20. Boîtes à moustaches illustrant les performances comportementales obtenues en pré et en posttest par le groupe contrôle et expérimentale. Le pourcentage de réponse correcte (en %) à gauche et le temps de réponse (en ms) à droite

Les mesures de l'amplitude de la MFT (illustrées en figure 21) ne laissent apparaître qu'un effet d'interférence pour la condition cl en prétest. En post test toutes les conditions sont associées à une amplitude de MFT équivalente. Des effets marginaux supplémentaires ont été trouvés pour le groupe expérimental indiquant une diminution de l'amplitude de la MFT dans la condition, ainsi que dans la condition cl. Outre ces résultats, les autres contrastes ne diffèrent pas et la variabilité de la mesure de la MFT ne permet pas d'observer d'effets plus fins.

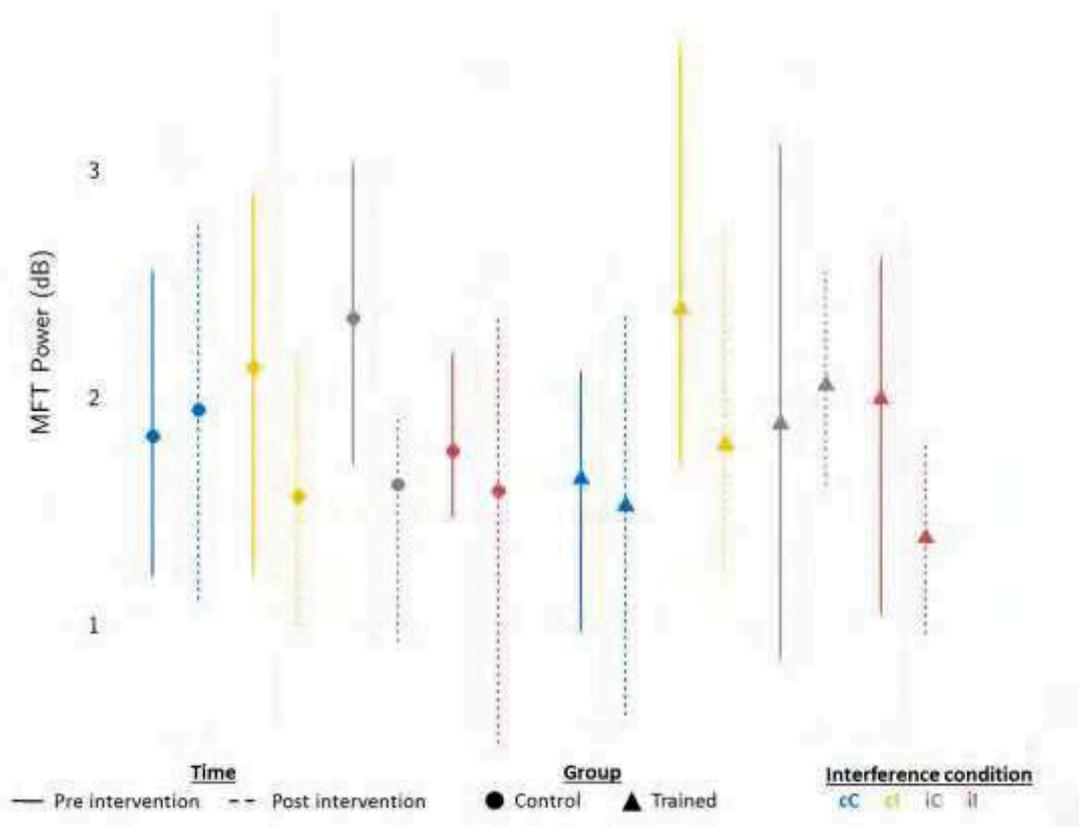


Figure 21. Graphique illustrant l'amplitude moyenne de l'activité neuro-oscillatoire thêta (en dB), ainsi que sa distribution, en pré et en posttest pour le groupe contrôle et le groupe expérimental.

4. Discussion

La maturité du jeu de faire semblant a été améliorée dans le groupe expérimental par rapport au groupe de contrôle actif. Des effets bénéfiques ont été observés sur plusieurs aspects du jeu, indiquant des situations de jeu plus complexes et plus riches nécessitant un plus grand engagement du contrôle cognitif et des capacités d'autorégulation. Cependant aucun effet bénéfique sur le contrôle cognitif n'a été trouvé sur le groupe expérimental par rapport au groupe contrôle.

D'autres études ayant entraîné le contrôle cognitif (entraînement basé sur de la répétition d'une tâche ou une mobilisation accrue d'une compétence spécifique) ont également reportés des bénéfices, principalement en MDT mais également dans les autres composantes du contrôle cognitif (Dowsett & Livesey, 2000; Kloo & Perner, 2003; Röthlisberger et al., 2012). D'autres études encore ne mettent en évidence aucun bénéfices cognitifs mais relèvent des changements neuronaux, interprétés comme reflets d'un développement accéléré par

l'entraînement (Rueda et al., 2012; Rueda, Posner, et al., 2004; Thorell et al., 2009). Dans notre étude nous n'avons trouvé aucun effet de l'entraînement au niveau neuronal, ni sur l'amplitude, ni sur la latence de la MFT. Cela suggère que l'entraînement ne permet pas d'améliorer davantage l'efficacité du contrôle cognitif que l'intervention contrôle.

Il se pourrait donc que l'intensité et la durée de nos activités d'entraînement, prédicteurs de bénéfices d'un entraînement (Diamond & Ling, 2016; Jaeggi et al., 2008), ne soient pas suffisantes pour avoir un impact positif sur la performance cognitive et l'autorégulation. Cela pourrait suggérer que pour un entraînement écologique, les paramètres de durée et d'intensité devraient être augmentés pour permettre que les réseaux cérébraux impliqués dans l'activité reçoivent suffisamment d'activation régulière pour améliorer leur efficacité.

Cependant, on constate que d'autres interventions basées sur le jeu, proposées dans des modalités de dosage similaires, ont montré des bénéfices sur l'inhibition, la MDT ou la flexibilité (Traverso et al., 2015). Ainsi, on peut penser que i) le contenu n'était pas assez stimulant, ou que ii) par rapport au contenu de notre entraînement un dosage plus conséquent aurait été nécessaire. Des différences dans le contenu des activités de jeu de faire semblant peuvent faire varier l'implémentation du contrôle cognitif et, par conséquent, induire des différences de développement. Thibodeau et ses collègues soutiennent que la dimension fantastique du jeu de faire semblant est nécessaire pour générer des avantages en MDT ou en alternance attentionnelle (Thibodeau et al., 2016). Peut-être que notre activité d'entraînement ne sollicitaient pas assez le contrôle cognitif en comparaison de notre groupe contrôle. Par ailleurs, les activités du groupe contrôle mobilisaient également le contrôle cognitif et l'autorégulation au travers de sa dimension sociale (i.e. partage, écoute et discipline) ou de par la nature des activités (maintien de but, attention). L'absence de bénéfice de l'activité expérimentale pourrait donc refléter des bénéfices chez le groupe contrôle. Dans l'étude susmentionnée de Traverso et collaborateurs (Traverso, et al., 2015), les enfants du groupe témoin n'étaient impliqués dans aucun cadre d'intervention, alors que dans la présente étude, un groupe contrôle actif a été utilisé. Les analyses montrent que tous les enfants se sont améliorés après une intervention dans la tâche exécutive. Cependant, il n'est pas possible de

distinguer l'effet du développement de l'effet du nouveau test ou de l'effet de l'intervention. L'hypothèse qui peut émerger de cette étude serait que l'accompagnement par un adulte dans un contexte de groupe (non spécifique à l'activité) impliquant des aptitudes sociales pourrait favoriser le développement du contrôle cognitif ainsi que de l'autorégulation (Qu, 2011; Vygotsky, 1978).

5. Conclusion

L'intervention a permis aux enfants du groupe expérimental d'améliorer leur autonomie et leur maturité lors du jeu. Cependant, pour ce qui est d'un effet plus distal sur l'autorégulation et sur le contrôle cognitif, la variabilité de nos différentes mesures ne nous permet pas d'attester d'une quelconque efficacité du programme expérimental lorsque l'on compare les bénéfices à ceux observés chez le groupe contrôle. Les mesures comportementales rapportées par les parents, les mesures cognitives ou cérébrales ne révèlent pas de différence majeure entre nos groupes. Un simple effet d'amélioration entre le prétest et le posttest est relevé. Il nous est donc impossible de conclure sur la plus-value apportée par des activités de jeu par rapport à des activités de groupes mobilisant elles aussi des compétences d'autorégulation.

6. Article de chapitre

Play Intervention does not benefit more the Cognitive Control Development than Directed Social Activities: a multidimensional approach from midfrontal theta oscillations to behavioral measures in Kindergarten children

Nicolas Adam^{*,} Agnès Blaye^{*,} Rasa Gulbinaite^{*,} Sylvain Chabb-Ferré^{*,} Chloé Farrer^{*,}

- Université de Toulouse, Centre de recherche Cerveau et Cognition, Toulouse, France
- Centre National de la Recherche Scientifique, France
- Université Aix-Marseille, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille, France
- Université de Lyon, Centre de Recherche en Neurosciences, Lyon, France
- Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale U1028, Lyon, France
- Institut of Advance Sciences of Toulouse, Toulouse, France

* Corresponding Author:

nicolas.adam@cirs.fr

(+33) 562 744 581

(+33) 674 771 091

Orcid ID | 0000-0001-6193-1472

Brain and Cognition Research Center
CNRS CERCO UMR 5549
CHU Purpan Pavillon Bandet
1, place do Dr. Baylac
31052 Toulouse Cedex

Abstract

This study analyzes the behavioral and neuronal effects of the implementation of an ecological training on cognitive control in preschool children. This research is featured as a quasi-experimental controlled study, involving 72 preschoolers (4 to 6 years). Over a ten-weeks period, twenty sessions of intervention were conducted (mean training time by subject 16 hours). Both experimental and control groups were assessed before and after the intervention based on the application of neuropsychological tasks. EEG power measurement of mid-frontal theta power amplitude [4-8Hz] relative to executive processing was extracted and analyzed. The results showed that trained children improved the maturity of their pretend play compared to control group. However, results do not show any significant change concerning the neuronal theta power when performing an interference control task known to elicited the higher level of conflict. At the behavioral level, we found a general increase of performance unspecific to group identity. This study could not conclude about the major interest of playing on cognitive control development but could suggest that social activities interacting with an adult may lead to improvement whatever the activity for children coming from low socio-economic level environment.

Keywords: Pretend Play Training, Cognitive control, EEG Theta power, preschool, conflict, interference

1. Introduction

1. Description and development of cognitive control

Cognitive control corresponds to a unitary process that regulate an optimal and adapted response in a specific context. It begins to be operational within the first months of life and develops throughout early childhood (Bell & Wolfe, 2007). Bailey and collaborators have recently modeled self-regulation as the use of different cognitive control functions (inhibition, flexibility, working memory, and attention). These functions are involved in different(s) regulatory domain(s) in an isolated way for younger children or in a more integrated manner for more mature people (Bailey & Jones, 2019). These cognitive control abilities mainly depend on prefrontal cortex (PFC) that show a very protracted growth, notably consecutive to structural modifications, and myelination or synaptic pruning (Brown & Jernigan, 2012; Bullins, Jha, Knickmeyer, & Gilmore, 2017). As a consequence, the development of cognitive control processes is also slow and does not reaches maturity before mid-adolescence (Bunge & Wright, 2007; Hsu & Jaeggi, 2013). Functional changes are reported during child development. Previous longitudinal or cross sectional EEG studies already demonstrated the role of mid frontal theta (MFT) activity in the implementation of cognitive control in children (Liu, Woltering, & Lewis, 2014). This MFT appears to be mirroring the activation of the ACC, a brain region acting as a central executive node (Cavanagh & Frank, 2014; Cohen & Cavanagh, 2011), and involved in the monitoring and the detection of the conflict. Thus, MFT power indicate a need for modulation of the cognitive control and consequently reflect the recruitment of executive processes relying on other brain areas as well as the amount of resources needed to overpass the detected conflict (Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter, & Cohen, 1999).

2. Implication and determinants of cognitive control

It is well documented that cognitive control development is affected by environmental factors. Children from low socio-economic backgrounds are often faced with schooling in disadvantaged areas, poor solicitations and interactions, limited social contacts, weak support, stressful environments, and poor parental practices (violence, negligence) (Moriguchi, 2014). These environmental factors could have a critical deleterious impact on cognitive control development, particularly on the development of inhibitory control and cognitive flexibility that are impeded in case of learning resources privation (Wiebe et al., 2011). Yet, it is known that regulation abilities, relying on cognitive control implementation, are critical for many aspects in life such as professional success, wealth or health (Moffitt et al., 2011), but particular interest is the predictive power on academic achievement (Brock, Rimm-Kaufman, Nathanson, & Grimm, 2009; Bull & Scerif, 2001; McClelland, Acock, Piccimin, Rhea, & Stallings, 2013). From the first years of school, well developed cognitive control is widely required to support learnings like reading and mathematics or more generally to adapt one's behavior in the scholar context (attention management, self-discipline, consideration of the other perspective, peer communication). Moreover, deficits in cognitive control could generate a vicious circle of academic failures across childhood. Morgan and colleagues report that deficits in cognitive control (principally the working memory component) amplified kindergarten children's risk of experiencing repeated mathematics, reading, and science difficulties across elementary school (Morgan et al., 2019). Well, cognitive control efficiency among elementary school also predict aspect of academic success like higher engagement in classroom activities, facilitation in the adaptation to elementary school and improvement in learning performance in general (Nelson et al., 2017).

3. Training of cognitive control

From the previous findings, training programs targeting cognitive control or more specific executive sub-components have been developed, implemented and assessed. They aimed to reduce the gap between advantaged and non-advantaged children before their entrance in first grade of school. Studies have shown that early interventions targeting children from these disadvantaged backgrounds could reduce or even eliminate the differences observed (Bryck & Fisher, 2012; Adele Diamond & Lee, 2011;

Klingberg, 2010). However, it is important to act as early as possible by providing preschoolers with appropriate programs to fill the gap and to reduce the impact of initial weaknesses upon entry to primary school (Sektman, McClelland, Acock, & Morrison, 2010). Especially since O'Shaughnessy and colleagues (2003) have shown that the differences observed at the beginning of schooling increase with time (O'Shaughnessy, Lane, Gresham, & Beebe-Frankenberger, 2003). The risk is then to see a downward spiral in which the child becomes aware of his weaknesses, doubt of his abilities, limits his personal expectations and may no longer wants to go to school (Adele Diamond & Ling, 2016a).

Previous studies have implemented and assessed computer-based training, focusing more targeting subcomponent of cognitive control (Holmes, Gathercole, & Dunning, 2009; Rueda, Checa, & Cómbita, 2012; Strobach, Salminen, Karbach, & Schubert, 2014; Thorell, Lindqvist, Nutley, Bohlin, & Klingberg, 2009). The findings indicate that with a sustained and progressive solicitation of these sub-components it was possible to show improvements in performance (executive attention, cognitive flexibility, working memory, inhibition). However, it has to be noted that the gain, often measured with a similar task were very restricted to the trained activity with no or little transferability of benefits (Bryck & Fisher, 2012). A few studies have collected both behavioral and neural measurements during assessment of these kind of training in preschoolers. They found that training could conduct to neural changes at the structural level (increase of white matter) (Krafnick, Flowers, Napoliello, & Eden, 2011), functional level (increase of connectivity) (Astle, Barnes, Baker, Colclough, & Woolrich, 2015), as well as changes in event-related potential link to conflict (increase of the N2 amplitude with training (Liu et al., 2014; Pietto, Kamienkowski, & Lipina, 2017). Rueda and collaborators (Rueda et al., 2012, 2004) found that cognitive control training affect both localization and temporality of the underlying neuronal processes. Indeed, conflict related neuronal activity (N2) become faster more efficient. These changes, that seems converging with maturational changes, are not automatically related with improvement in behavioral performances (Rueda et al., 2012, 2004). The hypothesis is that a behavior is the reflection of cognitive processing but not only. Indeed, socio-emotional aspects (like motivation, frustration or anxiety) could interact within these processing into a widespread network and modulate the response. In brief, training have to encompass broader regulatory-level to strengthen underlying neural network related to implementation of cognitive control within each of the regulatory domain (cognitive, social, and emotional).

Ecological context allows to stimulate the cognitive control in a larger variety of context with skills such as consideration of other's thoughts, empathy and theory of the mind. For example, Qu states that collaborative situations will facilitate the development of the cognitive control (Qu, 2011). Other non-cognitive aspects will be solicited such as engagement, socio-emotional attributes or motivation; aspects that should not be overlooked and that according to Heckman and Masterov (2007) are the main factors explaining the long-term benefits of interventions targeting children (Heckman & Masterov, 2007).

Intervention programs targeting preschool children show long-term positive effects on various aspects such as: reduction of school remediation needs, higher level of education and economic well-being, as well as propensity reduced crime (Reynolds, Temple, & Ou, 2010). These authors estimate that these long-term observed benefits can be explained mainly by cognitive skills and that they are "non-cognitive", referring to the emotional aspects developed through the interventions. Among the studies that have investigated the effects of these interventions, a large variety of executive measures have been used, and even if many analyze objective performances through standardized tests, interpretation or measurements are not always coherent. However, only few of them measure the effects that the interventions have on the substrate of the driven executive functions: the brain. It is therefore possible to question the nature of the benefits observed and the concrete, lasting and useful effect that these interventions can have.

4. Play-based interventions: ecological trainings

Pretend play is commonly observed in children from 3 years of age and requires to specifically implement the symbolic function. Woolley & Tullos (2008) defines pretend play as a type of play involving the imaginary, in which the child claims to be an animal or another person. Indeed, the child

will assume a role that will maintain and evolve throughout the game. It can also assign a role or function to someone or something, real or imaginary, with who / what he will be able to interact with (Woolley & Tullos, 2008). It allows a stimulation of the three central executive functions in parallel to socio-emotional abilities (Russ & Kaugars, 2001; Russ & Schafer, 2006; Seja & Russ, 1999). At a cognitive level, the working memory is mobilized through the maintenance of the roles in memory (personal role and that of the playmates). Inhibition occurs when the child has to constrain his behavior to be consistent with the established scenario. The child may then have to refrain from acting according to his own temperament but on the contrary according to the traits of his character or relationships that unite with other characters. Finally, mental flexibility is required to evolve in the game, to adjust flexibly to the story twists and more or less unexpected evolution of the scenario. The same three core EFs are solicited in the social domain through turn taking, consideration of other's opinion, cooperation or negotiation are mobilized (Fisher, 1992) as well as in the emotional domain where regulation competencies are recruited to allow the children dealing with their feelings (frustration, angry, excitation) and internal states (L. A. Barnett, 1984; L. A. Barnett & Kleiber, 1984; Dansky, 1980; Galyer & Evans, 2001). Overall, the child play become more and more mature and sophisticated with the global cognition development (Orr & Geva, 2015), but more specifically with the development of CC through increase of self-regulation, problem solving, planning (Whitebread, Coltman, Jameson, & Lander, 2016).

Thus, play is incorporated into pedagogical programs. Among them we can report the Tools of the Mind curriculum, a full educational program inspired by the the Vygostkyan approach of learning, which one of the central activities is the pretend play (Bodrova, 2008; Bodrova & Leong, 2013). This curriculum has been assessed and benefits like stress reduction in classroom, increase of peer cooperation, increase in the maturity of play, increase of cognitive control (cognitive flexibility and inhibitory control) measured by informative executive task were reported (W. S. Barnett et al., 2008; Blair & Raver, 2014; Adele Diamond, Steven Barnett, Thomas, & Munro, 2007). However, it is difficult to disentangle benefits coming from the play-based activities and the other components of the curriculum as reading activities, literacy learning approach or the focus made in planning and global self-regulation in each scholar situation.

In the current study, the aim was to determinate if an intervention focused only on pretend play activities, which is proposed in a classical curriculum, could leads to similar benefits, if necessary, measure them, and to evaluate how these benefits are reflected through the neural activity corresponding to conflict management during an informative executive task.

We reviewed the recent literature referring only to play-based training for preschool children where executive or cognitive control measures have been used in a pre-post controlled design. We only found four studies proposing social pretend play based training targeting cognitive control abilities of preschool children that met our criteria (Chung & Silva, 2013; Dansky, 1980; Thibodeau, Gilpin, Brown, & Meyer, 2016; Traverso, Viterbori, & Usai, 2015). However, none of them have used neural measures in combination to behavioral and neuropsychological assessment in their experimental protocol. It is important to report that in these two studies, assessment task and training content were very different and were only related on their cognitive control requirement.

Results indicate that school-based weekly sessions of social pretend play could lead to improvement in working memory and flexibility measure leading to a better accuracy in tasks (Chung & Silva, 2013; Dansky, 1980; Thibodeau et al., 2016; Traverso et al., 2015). However, there is no evident consistency between studies, in the framing of playing sessions that could explain some differences in results. For example benefits were found on the flexibility measured with the Dimensional Change Card Sort task for Thibodeau and colleagues but not for Chung & de Silva (Chung & Silva, 2013; Thibodeau et al., 2016). Traverso and colleagues (2015) also report improvement in inhibition assessed through a delay of gratification task. Thus, pretend play activities set up with a stimulating framework seems to support the cognitive control development and use within a broad range of situation. However, these findings did not inform us about the neural underpinning of these benefits. The current study aimed to use the same method used by Adam et al., to appreciate developmental effect, not of age, but of ten weeks of a social pretend play based intervention targeting selfregulation in preschoolers (4 to 6 years).

2. Material and methods

1. Study design

The sample size was determined based on the effect sizes reported in prior literature (Blair & Raver, 2014) and on the minimal detectable effect calculation for three measures (Heart & Flower task, Raven matrices and EVIP) to ensure the possibility to catch small to medium effect with these measures. This a priori power analysis revealed that a sample of 100 children should provide sufficient power (>0.8) to detect a small to moderate interaction effect of time by condition assuming $\alpha = 0.05$. Unfortunately, we do not reach this sample size.

2. Participants

The sample of 72 children ($M = 60.44$ months, $SD = 6.63$, range = 47–71 months, 39 boys and 33 girls) included preschool children at two French schools in areas with low-income families. Parents were provided with written information as well an oral presentation about the study and received a passive (opt-out) consent form. Parents were invited to fill out a general information questionnaire. Finally, only 28 families (= 40%) returned the questionnaire and so, unfortunately, information was collected but not analyzed. The median reported family income for both sites was \$25,000–50,000 annually. Children gave an oral consent before starting the experiment and were rewarded with a small gift and a 'diploma' at the end of the study. The study protocol was approved by the local ethics committee (N° 2-15038).

3. Measures

Dependent measures were collected at two time points: (1) within 6 weeks prior to the start of the ten-weeks intervention (Pre-test), (2) within 6-weeks following the intervention (Post-test). These measures included a control cognitive task, a measure of receptive vocabulary skills, a simple measure of behavioral regulation and a measure of non-verbal intelligence. In addition, the parent's reports of children's behavior were collected at both time points.

1. Heart & flower task

To assess cognitive control, an adaptation of the Hearts & flowers (H&F) version of the dots task was administered (Davidson, Amso, Anderson, & Diamond, 2006; Adele Diamond et al., 2007). This task is appropriate from four year of age and engages all CC subcomponents. Moreover, the generated interference conditions are particularly appropriate to study the implication of inhibitory control (i.e. inhibiting the natural tendency to respond on the side where the stimulus appeared) and cognitive flexibility (i.e. dynamically switching between in-mind rules) in conflict resolution (Adam, Blaye, Gulbinaite, Delorme, & Farrer, in review).

The experimental paradigm was similar as that used in Adam et al (in review) and is presented in the figure 1 (Adam et al., in review). The task was presented on a MacBook Pro Laptop (13.3-in, screen refresh rate: 60Hz) using the OpenSesame software (Mathôt, Schreij, & Theeuwes, 2012) to display stimuli and record responses. Responses were collected via a button box with two buttons (for left and right index fingers). Participants were positioned approximately 0.40 m from the screen. Children were presented with a central black fixation cross (70 mm diameter, 1°) with either a red heart or a red flower (30 mm diameter, 4.3°) appearing on the left or the right (20 mm, 2.87°) of the fixation cross. Children were instructed to respond as fast as possible when a stimulus appeared. The stimulus remained on the screen until a response was made or up to a maximal time duration of 2500ms. Once the children gave a response, they received a visuo-auditory feedback with a low-pitched tone of 500 ms accompanied by a surprised face for an incorrect response or an absence of response, and a high-pitched tone of 500ms accompanied by a happy face for a correct response.

The task consisted of 8 blocks of 16 trials each (128 trials in total) with compatible (“press the key on the same side as the heart”) and incompatible (“press the key on the side opposite the flower”) intermixed trials. Each condition (compatible and incompatible) was first introduced separately with four demonstration trials and understanding was checked with a practice block of 12 trials for both condition. If necessary, the practice trials were repeated (up to three times) to ensure that the participant had understood the task and the condition-specific requirements. Then, the mixed condition (50% of compatible trials and 50% of incompatible trials) was presented with the same modalities.

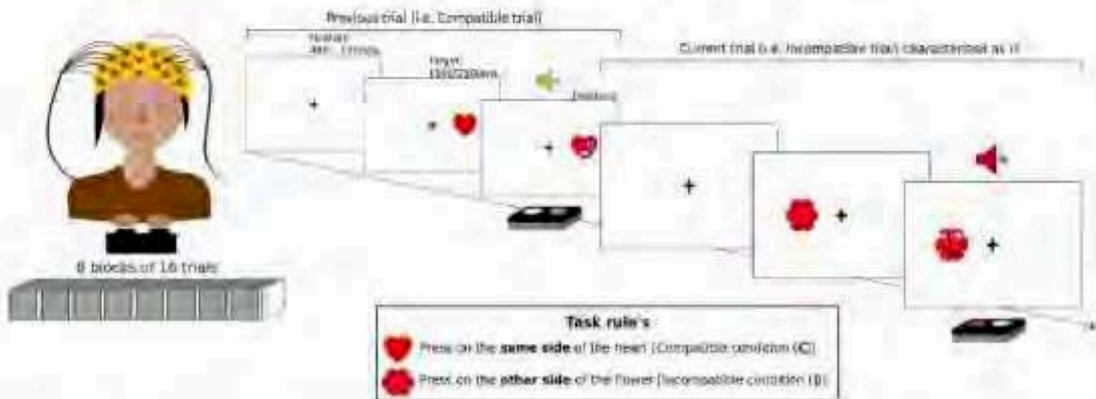


Figure 1: Experimental paradigm of the Heart & Flower task with illustration of an incompatible current trial that follow a previous incompatible trial. This trial requires overpassing the pre-potent response of the current trial and to alternate task-set compared with the previous trial

This paradigm allows the assessment of the developmental effect of age on interference control via four levels of interference based on the implementation of different cognitive control functions (Adam et al., in review): i) the null interference level, ii) the response interference (when the two dimensions of the stimulus lead to distinct responses, children have to inhibit automatic tendencies to achieve the task), iii) the task-set interference (when children have to inhibit the previous task-set activated and to flexibly switch to an other one: the current, that is associated with another stimulus-response mapping), and iv) the combination of response and task-set interference. By looking at the generated interference, it is possible to evaluate how cognitive control is mobilized and to separately observe the impact of specific cognitive control functions on performance.

2. French version of Peabody Picture Vocabulary Scale

French vocabulary understanding was assessed using the EVIP (Dunn & Dunn, 1997). The test required about 20 minutes to be achieved and involved children identifying a word pronounced by the experimenter by pointing with their fingers a picture among a set of 4 pictures displayed on a notebook in front of them. Testing followed the standardized procedure with age-appropriate starting points. Raw scores were calculated based on the number of correct responses.

3. Raven's Colored Progressive Matrices

The Colored Progressive Matrices (CPM, Raven, 1947) is a child-friendly version of the Raven's Matrices. It is a standardized non-verbal test assessing non-verbal intelligence. It consists of 36 series of incomplete patterns where children have to complete by choosing the missing piece among six propositions. The task was presented as a puzzle and children were invited to think about what piece could be the correct one to complete the image. Scores were then age-normalized.

4. The Head-To-Toe-Task

The Head-To-Toes-Task (H3T, Ponitz, McClelland, Matthews, & Morrison, 2009) is a simple task evaluating behavioral regulation in face of an interference between a command and an action to do. The child is instructed to act as fast as possible and to touch his head if the experimenter says "Toe" or to touch his "Toe" if the experimenter says "Head". A total of 10 commands were given to the child. A score of 2 was attributed if the child responded correctly, 1 if they first made a mistake but corrected themselves and 0 in case of an uncorrected mistake. Thus, a score between 0 and 20 could be reached.

5. Behavioral Rating Inventory of Executive Functions

The French version of the BRIEF (Roy, Fournet, Roulin, & Le Gall, 2013) questionnaire was distributed to parents to assess CC sub-components involved in the self-regulation of their children's behavior in daily life. This questionnaire standardized for children from 5 years of age onwards. It is composed of 86 ecological questions asking parents to rate, on a 3 points Likert's scale from Always to Never, a proposition like "My child has tears easily coming to their eyes" or "My child is uncomfortable with turn-taking". This questionnaire allows the computation of various scores and sub-scores. Because we used this questionnaire on children younger than five years of age and because we only used this measure to compare children, we only consider raw scores. Of particular interest is the Behavioral Regulation Index score that is constructed based on questions related to the level of inhibition, flexibility and emotional control.

6. Socio affective profile

The Socio-affective Profile (SAP) (Dumas, LaFrenière, Capuano, & Durning, 1997) was also one of the behavioral rating scales completed by parents. It is a 5 points Likert's scale from Never to Always comprising 80 questions that assesses more specifically socio-emotional skills. SAP also allows the computation of sub-scores and is adapted to 4 years old children.

7. General Information Questionnaire (GIQ)

The demographic information was obtained from parents. The GIQ included questions about the family life of children (siblings, language spoken at home, physical activity practiced), scholar information (age of entrance at school, particular event), parent's information (Education, Profession, Salary Range), and information about the child (Prematurity, Health problems).

8. Maturity of play Grid

An observational approach was used following the method implemented by Bodrova (2008). They developed a quotation grid to appreciate the maturity of pretend play mirroring the implementation of self-regulation as well as well-developed cognitive control processes during play time. The original grid was composed of 6 aspects: Planning, Role, Scenario, Accessories (defined under by "Propels" in the original grid), Time management and Language. Because the Time management sub-scale was not adapted to our assessment procedure we only assessed the 5 other aspects. The quotation grid was adapted from Leong & Bodrova (2012) and can be found in the supplemental materials. This tool defines the level of maturation of the playing behavior relative to each specific and highly related executive-processes aspects. For example, the Propels subscale is composed of 5 levels from "Interacts with the prop in a sensory-moto manner" in the less developed case to "Is able to pretend, does not need objects to stay in a role and objects may have a role" for the more mature children. This quotation was done by non-blind experimenter. However, cross-assessment was done by two to four experimenters and because the grid has to be fill by mentioning an observed illustrative case that justifies the selected maturity level, the experimenter-bias is limited. Moreover, observation playing-session was recorded to deliberate in case of contradictory scoring.

4. Procedure

During the pre-test phase, children were individually assessed during two one-hour sessions (including breaks) distributed over two non-consecutive mornings (a testing session for CPM and EVIP, and another for HF with 35 minutes dedicated to the EEG set up). The entire EEG recording was obtained for 52 children. Attrition was due to a refusal from either the parents or the children to perform the EEG recording. During EEG testing, material was first presented to children, then the child and the experimenter installed the EEG cap together on a teddy bear. When the child was comfortable with the material, the experimenter installed it while the child watched a cartoon. After completion of the first session, children were assigned to either the experimental (to-be-trained) or the active control (untrained) group. The sample was composed of 69 children, two children were not included because they were reported with developmental disorders and one child moved just after the pre-training phase. Considering the sample size the assignment was not randomized but was made with a pairing procedure so groups would be equilibrated in terms of IQ, vocabulary comprehension and performance at the HF task.

Both experimental group (N=36) and control group (N=33) were sub-divided into smaller groups of four children, mixing boys and girls, MSM and GSM children (French levels for respectively 2nd and 3rd years in pre-school). The playgroups were held on the same days and times each week, in the mornings, as part of the regular preschool day. Testing and training was carried out by trained experimenters to ensure reliability. Control activities involved regular classroom playful art activities like drawing, modelling clay or cutting-gluing works and were carried out under the supervision of a trained internship student. Each group was collected in classes twice a week and taken to a known quiet room in a part of the school away from distractions. Each session lasted 45 minutes, after which the group was taken back to their classroom. The intervention was carried out during 10 weeks with a total of 20 sessions. The intervention was carried out during 10 weeks with a total of 20 session following previous research (Tominey & McClelland, 2011; Traverso et al., 2015). Attendance was recorded for each child. Children attended an average of 16 sessions (range 9-18) in the intervention group and an average of 15.4 sessions (range 8-18) in the control group. The most common reason for a child to miss a session was an absence due to illness, vacation or irregular presence at kindergarten.

After the training phase, assessment was conducted again with the same procedure used in the pre-training phase. A further two children were removed from the sample due to relative long times of absence during training (N = 1 child in the experimental group) or for an absence during the post-training phase (N = 1 child in the control group).

1. Training program: Supervised social pretend play

Training program was developed with regard to evidence-based recommendations or findings coming from social play-based trainings of cognitive control. Major focus was made on the i) scenarii content (Bodrova & Leong, 2013; Umek & Musek, 2001; Thibodeau et al., 2016; Umek, Musek, Pecjak, & Kranjc, 1999; Weisberg et al., 2015), ii) emotional content/stimulation (Dias & Seabra, 2016); iii) props and accessories (Bodrova, 2008; Bodrova & Leong, 2013); iv) language and verbalization (de Chantal & Markovits, 2017; Landry, Pagé, & Bouchard, 2014) and v) scaffolding and role of the experimenter (Deneault, Lefebvre, & Rousseau, 2014; Karpov & Karpov, 2005; Krafft & Berk, 1998; Leong & Bodrova, 2012; Pellegrini, Dupuis, & Smith, 2007).

Each session was composed of three steps:

i) The briefing (+/- 10 minutes). The playing session theme was introduced to children through a video, story, or pictures to ensure a minimum of common knowledge. During this phase, children were sitting in front of the experimenter. The experimenter presented the play area and asked each child to define his role and explicit some actions and interactions that could be achieved by his character. Once each child had defined these elements, the frame of the story was delimited and children could start playing. To support children to maintain this frame, a story-board was used with pictograms that

represented each character and their chosen action as well as a repertory of some possible action that could be realized. The story-board also showed a map of the imaginary environment. This scaffolding of support materials evolved across sessions in order to progressively optimize the use of cognitive control.

ii) The supervised game (+/- 25 minutes). Children were encouraged to play freely within the framework initially created. The experimenter embodied a non-role overseeing the game without intervening. He could, however, momentarily endorsed a role to support the game when he noticed a lack of dynamism or intervene as a guide in his non-role to help a blocked child. He could also act in case of conflict to resolve the situation and help the children to find a way out. The themes of the supervised games were changing every week to maintain motivation. A progressive program of themes was created with respect to the familiarity and to the fantasy dimension of the scenes that could be played. Bridges between scenes were anticipated to ensure a comfort zone for children with the most difficulty when switching to a new theme. The accessories available also evolved according to the progression in the training program. Accessories were classified relative to their symbolic dimension. Thus, at the beginning, accessories were mainly concrete toys as well as figurative accessories directly related to the theme of the game session (i.e. medical equipment for the doctor's theme, plastic fruits for the market scenario), but progressively neutral accessories (plastic boxes, pieces of fabric, plastic tubes) as well as non relative toys were included in the available set of accessories. The representation and disposition of the play area, as well as the elements made available (modules, benches, chair) also became more and more symbolic. At the beginning, there were a few well defined areas, arranged with coherent furniture (e.g. there were two areas for the restaurant scenario: a kitchen separated by a bench of the restaurant room with a table and chairs). Progressively, the areas were less defined while the imaginary environment became more sophisticated and children were freer to give them their own representation and to change this representation during the game.

iii) The debriefing (+/- 10 minutes). Children were regrouped in front of the experimenter. They were encouraged to individually recall the theme of the playing session and their actions during the game. The experimenter asked questions about details encouraging children to take into account the temporality of events (i.e. "What happened just before the oven was broken?") and also asking children to imagine alternatives to what happened in the game (i.e. "What could have happened if you did not have tools to fix the oven?").

5. EEG procedure

A pre-analysis was registered and uploaded on the the American Economic Association's registry for randomized controlled trials before looking at the data. Analysis was performed using R statistics software. We used linear mixed-effects models, a flexible statistical technique that allows for the inclusion of multiple individual measurements per subject and/or conditions and that is also adapted for unbalanced analysis plan.

The EEG recording and processing parameters were the same as those used by Adam et al., (in review). Briefly, a Biosemi Active-Two amplifier system with 64-channels positioned according to the 10-20 International system was used. Continuous data was epoched from -1500 to 3000 ms relatively to the stimulus onset. Epochs containing ocular and motor artifacts during the baseline or stimulus presentation time were rejected. Thereafter, independent component analysis (ICA) was performed (Delorme & Makeig, 2004), and components that did not account for the brain activity (eye-blinks, horizontal eye-movements or muscle activity) were subtracted from the data (Chaumon, Bishop, & Busch, 2015). Only correct response trials were included in the analysis, errors, post-errors, anticipatory responses as well as warm-up trials (first trial of each block) were removed from the data. After the preprocessing steps, analyses were done on the averaged EEG measures computed on a total of 1695 cC¹, 1932 cI, 1883 cI

¹ By convention to describe a sequence effect we use a lowercase letter to describe the previous essay and a capital letter for the current essay

and 1680 il trials, with an average of 82 trials per child and a total of 2623 cC, 2947 cI, 2865 cI and 2660 il trials with an average of 92 trials per child. Children who had been excluded from the behavioral analyses were also excluded from the EEG analyses. We isolated mid-frontal theta (MFT) activity using optimal spatial filters - a weighted combination of all channels - designed to maximize power in the theta band (Cohen, 2017; Gulbinaite, van Viegen, Wieling, Cohen, & VanRullen, 2017).

Conflict-related brain activity was extracted during cognitive control processing (stimulus-locked analysis) time windows (Cavanagh, Zambrano-Vazquez, & Allen, 2012; Gulbinaite, van Rijn, & Cohen, 2014). To extract individual theta measures we first identified the individual theta power peak in the condition-averaged data and determined a subject specific window both in frequency (± 1 Hz) and time (± 150 ms) to compute the average of theta power. A theta measure was then extracted for each trial by averaging the raw power observed during the subject specific time and frequency window. Finally, the single-trial power values were averaged across trials for each condition separately, and normalized relative to the condition-average baseline period (-400 -100 ms) using a decibel (dB) transform at each frequency:

$$\text{dB power} = 10 \times \log_{10}[\text{power}/\text{baseline}]$$

Conversion to a dB scale ensures that data across all frequencies, time points, electrodes, conditions, and subjects were in the same scale and thus were comparable.

6. Final sample

Fifteen subjects were removed from the analyses because of very poor performance on task (error rate $> 45\%$; $N=8$), or technical problems ($N=7$). The final sample was then composed of 60 children with experimental group ($N=31$) and control group ($N=29$). Note however that all measures were not available for each child (consecutive to technical issues, refusal from the children/parent or very poor performances) and were considered as missing values during analyzes. See Table 1 for the summary and a description of available data per group.

Play intervention does not benefit more the Cognitive Control Development than Directed Social Activities: a multidimensional approach from midfrontal theta oscillations to behavioral measures in Kindergarten children

Table 1. Demographic measures of experimental and control group (obtained on the basis of parent reports)

Demographic measure	Experimental group				Control group			
	N	Mean	SD	Range	N	Mean	SD	Range
Age (months)	31	60,5	6,4	48,2 - 70,9	29	62,6	6,1	52,2 - 71,4
Household monthly salary (€)	24	2126,1	884,3	800 - 3000	19	2426,3	1228,7	800 - 5000
Birth weight (kg)	19	3,3	0,6	2,5 - 4,5	13	3,1	0,9	0,785 - 3,9
Daily sleep time (h)	21	10,4	0,6	9,5 - 11,5	15	10,2	0,9	7,5 - 11,25
Weekly screen time consume (h)	21	10	5,3	1 - 21	14	10,7	7,9	2 - 28
Age of entrance at kindergarten (months)	23	35,5	4,5	30 - 48	20	39,7	8,8	30 - 66
Intervention attendance (h)	31	12,2	1,3	7,5 - 13,5	29	11,5	1,8	6 - 13,5
Gender	16 boys - 15 girls				15 boys - 14 girls			
Grade composition	16 MSM - 15 GMS				10 MSM - 19 GMS			
Cognitive measure	N	Mean	SD	Range	N	Mean	SD	Range
Non verbal Intelligence	31	19,6	6,3	8 - 30	29	20,4	6,1	10 - 29
Language comprehension	31	105,2	21,7	67 - 160	29	105,5	23	62 - 147
Behavioral selfregulation	30	15,3	4,2	4 - 20	29	16,4	3,8	9 - 20
	N	Under Bachelor	Bachelor	Higher Bachelor	N	Under Bachelor	Bachelor	Higher Bachelor
Parents Education (mother)	23	8	7	8	18	7	6	5
Parents Education (father)	22	4	5	13	16	2	5	9
	N	Below poverty line	Below 30% of average	Above median	N	Below poverty line	Below 30% of average	Above median
Household incomes level	24	12	12	0	20	10	1	2
	N	Yes	No		N	Yes	No	
Hobbies Sport practice	24	5	19		19	6	13	
Bilingual environment	24	11	13		20	8	12	
Used to play at home	22	22	0		15	15	0	
Stressed child	22	3	19		15	2	13	

7. Analytical procedure

1. Pre - post analyze

First, the data was analyzed indifferently of the treatment factor to evaluate an eventual re-test effect. To do this, individual average performance was considered. An FDR corrected two-tailed t-test was used for each measure (pre-intervention versus post-intervention). To compare performance between interference conditions at each time. A linear model was also constructed using the interference condition and the time of assessment (test versus re-test) as fixed effects. Post-hoc comparisons were performed using the FDR correction.

2. Intervention analyzes

A pairwise methodology was applied to assess the benefits of the training following recommendations made by McKenzie (Bruhn & McKenzie, 2009; McKenzie, 2011). Pairs were created based on performance achieved in the Heart & Flower task in the pre-training assessment (RT and Accuracy outcomes). Thus, each child was coupled with another child that reached a similar performance, and thus with an expected similar level of cognitive control. It should be mentioned that even if using a pairwise procedure is a rigorous way to assess the benefits of an intervention, it also has major inconvenient. Indeed, attrition dramatically affected the sample size: for each child lost from the initial sample the paired children must be excluded too. Consecutively for pair-based analyses, only 52 children could be considered in our analysis.

Final analyses were done using two approaches depending on the distribution of the variables in question during the pre-training session (McKenzie, 2011). In the first case, when the pre-assessment variables were not significantly different between experimental and control groups, the post-assessment variable was considered. Consequently, the variable obtained in the post-training session was analyzed through a linear regression model by adding the group factor (control vs experimental) and the pair factor (a total of 26 pairs) as a predictor factor. Otherwise, if the pre-assessment variables were significantly different (or close to be significantly different) between experimental and control groups, a pre-post approach was used on the same sample. Linear model analyses were conducted in the R software (R Core Team, 2014). Normality of residuals was checked via density plots.

All outcomes were rescaled by centering them at their sample mean and dividing them by their sample standard deviation, so all results can be interpreted in terms of effect size. The classical denomination for effect sizes in terms of Cohen's *d* is used (Large is for an effect around .8 of a standard deviation, Medium is for an effect around .5 of a standard deviation, Small is for an effect around .2 of a standard deviation, Very small is for an effect around .02 of a standard deviation). Effect sizes (with related 95% confidence intervals) were analyzed to determine the efficiency of the effect of the training on the variable and are reported in the result section, for convenience *p*-value were then calculated with the computation of the *t*. statistic.

However, we are also interested in the interference management between different conditions of interference within and between each group. Thus, additional linear models with random effects were computed on the RT (i.e. reaction times), Accuracy, MFT and latency of the MFT peak with Interference factor (cC, iC, cI, iI), Time factor (PRE vs POST) as well as Group factor (Ctrl vs Exp) used as fixed effect, and Pair factor as random effect. Note that for the not-normally distributed accuracy scores, a glm model with Poisson family was computed. For the latency model, only Time and Group were added as fixed effect. The Chi-square Test for Independence was then used to determine the relation between variables: the Chi-square (χ^2), the degree of freedom and associated *p*-value are reported for main effects. Post-hoc comparisons were then performed, the estimation of the difference (with 95% confidence interval), the *t*-statistic (using the Satterthwaite method), the degree of freedom (computed with the kenward-Roger method), and *p*-value are reported (with Tuckey-correction for multiple comparison).

3. Results

1. Re-test effect

A main effect of TIME was observed for each variable RT ($\chi(1)=81.76, p<.001$), Accuracy ($\chi(1)=60.88, p<.001$), MFT ($\chi(1)=6.71, p<.01$) and Latency ($\chi(1)=4.60, p<.05$).

Post-hoc analyses reveals than changes are reflective a decrease of RT in the re-test ($\Delta_{pre/post} = -148\text{ms}$ [-181 -116]; $t(119.05) = 9.006, p<.0001$), a increase of Accuracy in the re-test ($\Delta_{pre/post} = -7.13\%$ [-3.90 10.36]; $z = -4.322, p<.0001$), a decrease in MFT in the re-test ($\Delta_{pre/post} = -0.34\text{ dB}$ [-0.59 -0.08]; $t(237.24) = 2.587, p=.01$) and a increase in the MFT peak in the re-test ($\Delta_{pre/post} = 79\text{ ms}$ [4 155]; $t(29.79) = -2.166, p=.04$). For others measures t.test were used and results are reported in the table 2 to appreciate the test-retest effect.

2. Training effect

The descriptive analysis of outcomes regarding to the treatment is presented in the table 3. These results show the differences (significant in blue) between the pre-post difference between groups within a similar measure.

The table 3 report than training only affected maturity of play for the experimental group. It could also be report than control group show improvement for the subscale "integrated – isolated" from the SAP questionnaire, as well as an improvement in the SAP global score.

Play intervention does not benefit more the Cognitive Control Development than Directed Social Activities: a multidimensional approach from midfrontal theta oscillations to behavioral measures in Kindergarten children

Table 2: Pre and Post estimations are reported (averaged on the group factor), 95% confidence interval of the difference is reported with related t-value and p-value, significance stars were added for convenience.

Task	Outcome	Pre	Post	t	CI - low	CI - high	df	p.adj	Effect
Tasks	EVIP	105,35	113,85	-2,21	-16,12	-0,88	116,72	0,07	
	CPM	19,97	24,27	-4,28	-6,29	-2,31	110,77	<.0001	***
	H3T	15,81	17,48	-2,84	-2,84	-0,5	86,94	0,02	*
BRIEF	Behavioral Regulation Index	45,46	45,10	0,18	-3,74	4,46	65,36	0,94	
	Inhibition	17,23	16,94	0,36	-1,36	1,95	65,58	0,85	
	Flexibility	11,98	12,03	-0,09	-1,21	1,11	72,26	0,94	
	Emotional Control	16,31	15,94	0,38	-1,56	2,3	65,29	0,85	
	Initiative	12,36	12,52	-0,21	-1,6	1,29	64,99	0,92	
	Working Memory	15,98	15,63	0,41	-1,36	2,06	68,62	0,85	
	Organisation	10,86	10,65	0,27	-1,33	1,75	72,53	0,89	
SAP	General Adaptation	35,23	34,74	0,56	-1,27	2,26	57,98	0,82	
	Social Behavior	43,43	43,71	-0,38	-1,75	1,19	56,89	0,85	
	Problem Internalization	32,07	31,06	1,64	-0,23	2,23	48,47	0,20	
	Problem Externalization	39,47	38,74	0,84	-1	2,45	58,97	0,61	
	Depressed - Happy	30,20	30,13	0,42	-0,27	0,41	58,04	0,85	
	Anxious - Confident	31,43	30,19	1,93	-0,07	2,55	31	0,13	
	Irritable - Tolerant	38,77	38,55	0,13	-3,34	3,8	59,99	0,94	
	Isolated - Integrated	42,60	42,16	0,49	-1,36	2,24	58,95	0,85	
	Aggressive - Controlled	43,40	42,58	0,71	-1,5	3,14	58,87	0,71	
	Egoist - Prosocial	45,73	45,61	0,08	-2,82	3,07	56,37	0,94	
Resistant - Cooperative	47,70	48,26	-0,33	-3,95	2,83	56,68	0,85		
Dependent - Autonom	50,10	51,03	-0,59	-4,11	2,25	54,65	0,81		
Maturity of Play Assessment	Planing	1,46	2,27	-5,46	-1,11	-0,52	76,19	<.0001	***
	Role	2,06	2,73	-3,39	-1,06	-0,28	100,61	<.001	**
	Propels	2,63	3,45	-4,15	-1,21	-0,43	99,47	<.0001	***
	Language	2,13	2,67	-2,52	-0,95	-0,11	97,27	0,04	*
	Scenario	2,19	2,80	-3,02	-1,01	-0,21	99,49	0,01	*

Table 3. Effect of Intervention on the pre-post differences between groups within a similar measure. The effect size is reported using the Cohen's d, associated standard error and related 95% confidence interval are presented ($CI_{95} = d \pm 1.96 \times \sigma(d)$) (Lee, 2016). The t-value and p-value were added for convenience. The R² and number of subject and pairs considered in the analyze are also reported.

Task	Outcome	Cohen d	$\sigma(\text{Cohen d})$	CI-low	CI-High	t	p.val	N	R ²	
Heart & Flower Task	TR (ms)		-0,22	0,22	-0,65	0,20	-1,033	0,311	60	0,732
		CC	-0,19	0,22	-0,61	0,23	-0,894	0,380	60	0,735
		CI	-0,10	0,26	-0,60	0,41	-0,381	0,706	60	0,621
		IC	-0,12	0,22	-0,56	0,31	0,547	0,589	60	0,716
		II	-0,41	0,25	-0,90	0,08	-1,641	0,113	60	0,643
	PRC (%)		0,00	0,28	-0,54	0,55	0,017	0,987	60	0,553
		CC	-0,05	0,32	-0,67	0,58	-0,148	0,884	60	0,422
		CI	-0,23	0,25	-0,72	0,26	-0,929	0,362	60	0,644
		IC	-0,02	0,28	-0,56	0,52	-0,074	0,941	60	0,560
		II	-0,04	0,29	-0,61	0,54	-0,132	0,896	60	0,508
	MFT (dB)		-0,09	0,34	-0,75	0,58	-0,26	0,80	42	0,643
		CC	-0,50	0,40	-1,28	0,28	-1,26	0,23	42	0,505
CI		0,14	0,40	-0,64	0,92	0,35	0,73	41	0,490	
IC		0,27	0,31	-0,33	0,88	0,89	0,39	42	0,701	
II		-0,11	0,24	-0,57	0,36	-0,46	0,66	42	0,825	
	Power_peak	0,10	0,36	-0,60	0,81	0,29	0,78	42	0,594	
Other tasks	EVIP	-0,06	0,25	-0,54	0,43	-0,234	0,818	60	0,651	
	CPM	0,35	0,24	-0,13	0,83	1,432	0,164	60	0,661	
	HST	-0,18	0,26	-0,70	0,33	-0,707	0,486	60	0,611	
BRIEF	Behavioral Regulation Inde	0,35	0,45	-0,54	1,24	0,778	0,462	31	0,831	
	Inhibition	0,00	0,45	-0,89	0,89	0,000	1,000	31	0,833	
	Flexibility	0,54	0,54	-0,51	1,59	1,007	0,343	33	0,713	
	Emotional Control	0,36	0,50	-0,61	1,34	0,732	0,485	32	0,745	
	Initiative	-0,50	0,44	-1,36	0,36	-1,141	0,287	31	0,796	
	Working Memory	0,00	0,64	-1,25	1,25	0,000	1,000	32	0,676	
	Organisation	0,24	0,52	-0,78	1,26	0,46	0,655	34	0,670	
SAP	General Adaptation	-0,57	0,23	-1,02	0,13	-2,525	0,040	31	0,952	
	Social Behavior	-0,43	0,34	-1,10	0,24	-1,257	0,249	31	0,891	
	Problem Internalization	-0,35	0,37	-1,07	0,37	-0,957	0,370	31	0,875	
	Problem Externalization	0,00	0,31	-0,61	0,61	0,000	1,000	31	0,909	
	Depressed - Happy	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,061	0,953	31	1,000	
	Anxious - Confident	0,00	0,00	0,00	0,00	0,155	0,881	31	1,000	
	Irritable - Tolerant	-0,25	0,47	-1,17	0,67	-0,531	0,612	31	0,792	
	Isolated - Integrated	-0,83	0,43	-1,76	-0,09	-2,171	0,067	31	0,830	
	Aggressive - Controlled	-0,37	0,25	-0,86	0,11	-1,507	0,175	31	0,943	
	Egotic - Prosocial	0,22	0,55	-0,87	1,30	0,391	0,707	31	0,713	
	Resistant - Cooperative	0,09	0,43	-0,77	0,93	0,192	0,853	31	0,825	
	Dependent - Autonom	0,14	0,53	-0,89	1,17	0,265	0,798	31	0,740	
Maturity of Play Assessment	Planning	0,85	0,27	0,32	1,39	3,126	0,005	51	0,703	
	Role	0,78	0,32	0,15	1,41	2,434	0,024	51	0,588	
	Propels	0,75	0,31	0,16	1,36	2,467	0,023	51	0,622	
	Language	1,03	0,26	0,53	1,54	3,987	0,001	51	0,731	
	Scenario	0,93	0,28	0,37	1,48	3,288	0,004	51	0,685	

1. Heart & Flower Task

Following analyzes were done to appreciate an eventual effect of training on the inference management in the H&F.

An effect of INTERFERENCE only appeared for behavioral measures RT ($\chi(3)=57.36, p<.001$) and Accuracy ($\chi(3)=27.17, p<.001$). The behavioral performances are illustrated in the figure 2.

Post-hoc analyses reveals that for RT, all interference conditions were associated to a delay in the response compared to the null-interference condition ($\Delta cC/cI = -146$ ms [-207 -87]; $t(119.05) = -6.345, p<.0001$; $\Delta cC/iC = -151$ ms [-211 -91]; $t(119.05) = -6.523, p<.0001$; $\Delta cC/iI = -72$ ms [-132 -11]; $t(119.05) = -3.092, p=.01$). However, for Accuracy the iC interference was the only to be associated with a difference relatively to the null-interference ($\Delta cC/iC = 4.44\%$ [0.49 8.40]; $z = 2.886, p=.02$). Accuracy for cI ($\Delta cC/cI = 2.23\%$ [-1.26 5.72]; $z = 1.638, p=.357$) and iI ($\Delta cC/iI = -1.96\%$ [-5.45 1.53]; $z = -1.443, p=.4722$) did not differ from the cC condition.

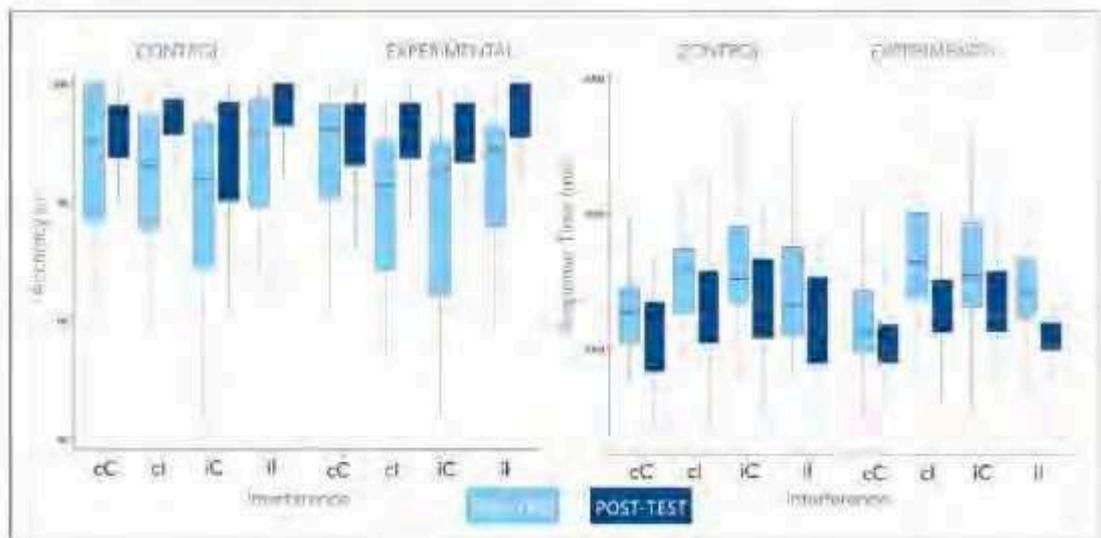


Figure 2: Boxplot with representation of distribution of the behavioral measures for each group by time and interference factors.

Additionally, a TIME x INTERFERENCE effect was found for Accuracy ($\chi(3)=8.63, p=.03$). This result indicates that all the interference conditions decrease but not the null-interference condition ($\Delta cC.pre/cC.post = 2.89\%$ [-0.87 6.67]; $z = -1.509, p=.13$; $\Delta cI.pre/cI.post = -9.28\%$ [4.29 14.27]; $z = -3.646, p<.001$; $\Delta iC.pre/iC.post = -9.01\%$ [4.13 13.9]; $z = -3.616, p<.001$; $\Delta iI.pre/iI.post = -7.33\%$ [2.76 11.91]; $z = -3.143, p=.002$). An additional contrast was performed to appreciate if the pre-post improvement of the performance related to an interference condition was different from the pre-post improvement related to the null-interference condition. To do that, the Pre-Post difference in accuracy was studied in similar linear model than those performed previously. Results indicates that only cI ($t(86.62) = 3.052, p=.016$) and iC ($t(86.62) = 3.186, p=.011$) conditions were associated to bigger differences, that is the iI pre-post improvement did not differ significantly from the cC pre-post improvement ($t(86.62) = 1.794, p=.28$). We then compared these improvement differences for cI and iC conditions relatively to the null-interference condition independently for each groups and found two close to be significant effects. They suggest that only the experimental group could show a decrease in the conflict induced by the interference iC compared to the null-interference condition ($\Delta cC/iC = 7.43\%$ [-0.01 14.87]; $t(86.62) = 2.617, p=.051$) and improvement for cI ($\Delta cC/iC = 6.96\%$ [-0.48 14.4];

$t(86.62) = 2.45, p=.075$) interference conditions, whereas for the control this effect was not significant neither for cI ($\Delta cC/cI = 5.56\%$ [-2.18 13.29], $t(92.57) = 1.879, p=.244$), nor for iC ($\Delta cC/iC = 5.63\%$ [-2.11 13.36], $t(92.57) = 1.903, p=.234$). However, contrast of contrast reveals that difference in the experimental and control group do not differ ($z=-0.484, p=.628$)

A TIME x GROUP x INTERFERENCE planned contrast was done on the MFT power amplitude. This analyze reveals that for both groups in post training, the MFT power amplitude did not differ in the null-interference condition compared to all the others interference conditions (for ctrl: $\Delta cC/cI = 0.39$ [-0.44 1.23]; $t(135.39) = 1.217, p=.617$; $\Delta cC/iC = 0.34$ [-0.49 1.17]; $t(135.39) = 1.046, p=.722$; $\Delta cC/iI = 0.37$ [-0.47 1.20]; $t(135.39) = 1.14, p=.666$; for exp: $\Delta cC/cI = -0.27$ [-1.18 0.63]; $t(137.37) = -0.791, p=.858$; $\Delta cC/iC = -0.54$ [-1.44 0.36]; $t(137.37) = -1.56, p=.405$; $\Delta cC/iI = 0.14$ [-0.76 1.05]; $t(137.37) = 0.421, p=.975$). While, we found a decrease in the amplitude of MFT power for iC condition for control group ($t(237.24) = 2.015, p=.04$), the MFT power amplitude in the iC condition did not differ between both Group neither in pre ($t(243.66) = 1.279, p=.202$), nor in post ($t(237.24) = -1.053, p=.293$) The amplitude of the MFT power for the iC condition did not change for experimental group between pre and post test ($t(243.66) = -0.338, p>.7$). Additional marginal effects were found for experimental group indicating a decrease in the amplitude of the MFT in the iI condition ($t(243.66) = -1.830, p=.0685$), as well as in the cI condition ($t(243.66) = -1.769, p=.0782$). Beside these findings other contrasts did not differ and variability of the MFT measure did not allow to observe finer effects.

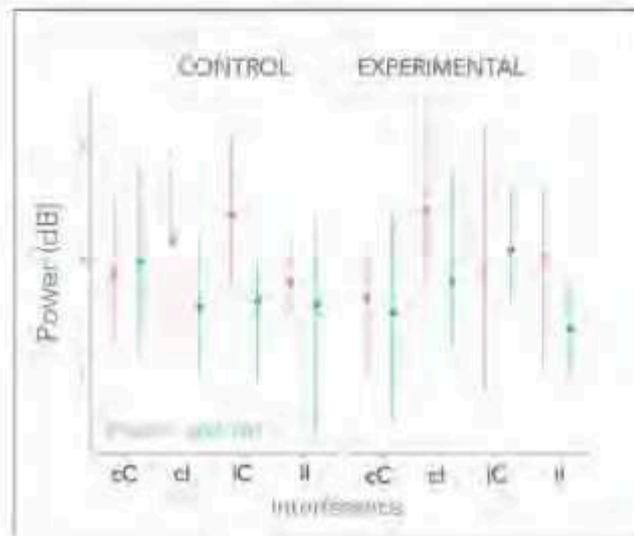


Figure 3: Point range plot with representation of distribution of the amplitude of the MFT for each group by time and interference factors.

2. Other tasks

Motor self-regulation, as measured through IBT, have been improved in the post-intervention assessment compared to the pre-intervention. Nonetheless, this measure did not allow to appreciate any intervention-related change through groups. The same verdict can be established for the fluid intelligence as measured through CPM. However, for EVIP the pre-post improvement is only marginal but could not be related to the intervention.

3. Questionnaires

1. BRIEF

The analyze of the BRIEF scores and sub-scores did not reveal any distinguishable effect, nor for the test-retest analyze, neither for the intervention analyze. Variables appear too noisy to let appear effect as indicated by the large confidence interval.

2. SAP

No effect of time has been observed for the SAP regarding the simple pre-post analysis. However, an increase in the 'general adaptation' scale was found for the control group only. A marginal increase in the sub-scale 'isolated – integrated' could mirrored a higher integration score for the control group than for the trained group after the intervention compared to before. Others subscales did not allow to distinguish any difference between both groups.

4. Maturity of play

Each assessed component scores of the maturity of play were higher in the post-intervention time than in the pre-intervention time. However, by comparing trained and control group, a higher increase has been observed for the children from the experimental group in each of the 4 analyzed components: planning, Roles, Propels and Scenario.

4. Discussion

The benefits of pretend play on cognitive development, in particular on self-regulated skills and executive functions, has been extensively theorized but empirical evidence is still scarce. The aim of the present study was to investigate whether well-structured pretend play activities can be used as an efficient training approach to promoting cognitive control as well as self-regulation skills. Another main goal of the present study was to further assess the neuronal mechanisms of this training and in particular whether it influences the development of the brain network supporting cognitive control. We obtained inconclusive results for most of our behavioral measures, as well as our cognitive and cerebral measures of cognitive control. Indeed, we obtained very poor precision of the estimated effects, our results being consistent with either positive or negative medium effects.

A poor or an inappropriate implementation of the pretend play activities cannot explain these results. We found that the maturity of pretend play was enhanced in the trained group compared to the active control group. This showed that the training was effective at improving the children's abilities and autonomy in the play as well as the richness and complexity of the play. Children benefited from the adults' scaffolding strategies for improving the maturity of their play. Beneficial effects were observed on several aspects of the play, denoting more complex and richer play situations that require a greater engagement of cognitive control and self-regulation skills. Trained children's play was associated with a richer scenario with more elaborated and complex situations. They mixed realistic and fantasy play elements. They had more complex roles, with children being able to play different roles in the course of the same scenario. They planned the play in advance, and used language in describing the scenarios, the roles and the actions prior and during the play.

However, despite important improvement in the child's play, we did not observe any beneficial effects on cognitive control, neither on inhibitory control nor on flexibility compared to the control group. Yet it has been shown that both inhibition and flexibility can benefit from training, with repeated and regular practices with cognitive tasks that specifically target these executive processes. Enhanced performance of cognitive flexibility was observed for prekindergarten children (Kloo & Perner, 2003; Rötthlisberger, Neuenschwander, Cimeli, Michel, & Roebers, 2012) Training of inhibitory control benefited the inhibitory skills of kindergarten children (Rötthlisberger et al., 2012), as well as preschool children with

poor inhibitory control (Dowsett & Livesey, 2000). However, other studies failed to find an effect of inhibition training in typically developing children (Rueda et al., 2004; Thorell et al., 2009). Other studies have reported positive intervention effects in those conditions that were more challenging for children (Diamond, Barnett, Thomas, & Munro, 2007). However, this was not the case for the present study as even in the conditions that were the more difficult for children, where children had to shift from one task set to another (Crone, Bunge, Van Der Molen, & Richard Ridderinkhof, 2006; Davidson et al., 2006), we did not show any positive effects of the training compared to the control group.

One crucial factor that explains the positive effects of training on executive functions and self-regulation is the intensity and the duration of the training (Buschkuhl, Hernandez-Garcia, Jaeggi, Bernard, & Jonides, 2010; Diamond & Ling, 2016b). A sufficient duration and intensity of the training are indeed necessary to enable sufficient and regular activation of brain networks supporting executive processes to positively improve their efficiency; hence resulting in enhanced cognitive performance. This might even be more crucial for ecologically realistic training where self-regulation and cognitive control are engaged within various cognitive, social and emotional domains; there upon recruiting more brain networks than those activated by cognitive training that targets specific executive cognitive processes. This could imply that the duration and intensity of an ecologically realistic training should be increased so that these different brain networks receive enough regular activation to improve their effectiveness. It could, therefore, be the case that the intensity and the duration of our training activities were not sufficient to positively impact cognitive performance and self-regulation. The curriculum *Tools of the Mind*, which puts a strong emphasis on the development of self-regulation across a wide variety of activities along all the class day, was associated with positive effects on children's executive functions and attention (Barnett et al., 2008; Blair & Raver, 2015; Diamond & Lee, 2011). In this curriculum, the support and the training of cognitive control were interwoven in pretend play activities as well as in other various academic and playgroup activities throughout the day. This provides the child with various daily opportunities to exercise those regulatory functions across cognitive, social and emotional domains, and therefore enough regular activation of the brain networks underlying these functions. The training activities of the present study were adapted from the pretend play activities of *Tools of the Mind*, but without all these additional daily activities that also put a strong emphasis on self-regulation. Therefore, our training might not have provided children with the sufficiently regular and intense engagement of these skills.

However, some studies, with fewer training sessions and a shorter duration of the training than in the present study have shown that regularly engaging into pretend play improve executive functions (Chung & Silva, 2013; Dansky, 1980; Thibodeau et al., 2016; Traverso et al., 2015). Children who participated in pretend play activities showed an enhanced capacity to inhibit a response, update information in working memory and deal with cognitive conflict, compared to children who had not played (Traverso et al., 2015). Differences in the content of the pretend play activities might place different demands on cognitive control and, as a result, might differently influence executive function performance. For example, Thibodeau and colleagues argue that the fantastical dimension of pretend play is necessary to generate benefits like enhanced working memory and attention shift performance and some evidences support this statement (Pierucci, O'Brien, McClunis, Gilpin, & Barber, 2014; Thibodeau et al., 2016; Weisberg et al., 2015). However, their conclusion was consecutive to a comparison between fantastical pretend play and playful activities (i.e. ball games, coloring). It is, therefore, not possible to differentiate the effect of pretend play and effect of fantastical pretend play. Thus the question concerning the necessity of a fantastical frame remains. In the present study, the content of the pretend play activities varied over the training course with more daily realistic scenarios at the beginning of the training and scenarios more oriented towards fantastical play at the end. Yet, we cannot assess whether the content of our pretend play activities has influenced children's executive functions and self-regulation as our pre-posttest design did not allow us to obtain assessments measures during the training to separately evaluate the effects associated with realistic vs. fantastic scenarios. The current study tends to validate the conclusion of Thibodeau and colleagues (Thibodeau et al., 2016), though without a real emphasis on fantastical dimension, no effects of the pretend play intervention was found. It would be interesting in the future to further study how this content might account for the effects observed on cognitive control and its cerebral mechanisms.

The various situations of pretend play provide the child with appropriate experiences for exercising his/her cognitive control. Several training evaluations have shown that brain measurements of cognitive control are more sensitive to training than their corresponding cognitive measures. Indeed, different training approaches have observed beneficial effects of training on cerebral markers of cognitive control with no associated effect on cognitive performance (Chang, Tsai, Chen, & Hung, 2013; Pozuelos et al., 2019; Rueda et al., 2012, 2004). Change in the event-related brain component N2 amplitude, that reflects the engagement of cognitive control associated with the resolution of a conflict (Bruchmann, Herper, Konrad, Pantev, & Huster, 2010; Kopp, Rist, & Mattler, 1996), is the most common effect report as neural effect of cognitive training on preschoolers (Pietto et al., 2017; Rueda et al., 2012, 2004). Yet other authors have found an effect on the training on the functional connectivity within this network (Astle et al., 2015). Enhanced connectivity between parietal and frontal areas, supporting working memory, as well as between striatal and prefrontal areas, supporting inhibition, were found for working memory and inhibition training, respectively. In the present study, we assessed the effect of pretend play training on the amplitude and the latency mid-frontal theta (MFT) oscillations that serve as a neural mechanism in the implementation of cognitive control as well as of its development (Cavanagh & Shackman, 2015; Cavanagh et al., 2012). However, we did not find any positive effects of the training on mid-frontal theta power nor on mid-frontal theta latency, suggesting that the training might not have influenced any neural mechanism. Considering the absence of training effect on this measure it could be the case that connectivity measurement within the theta range might be more sensitive to the training effect than the power and the latency of mid-frontal theta. Future studies will have to assess the effect of pretend play on the functional connectivity of the brain network underlying cognitive control.

Pretend play activities engage various self-regulation skills across cognitive but also social and emotional domains. In our training activities, cognitive control was indeed required during social interactions between children as well as during situations that require regulating emotions for enabling the child to adapt her/his actions to another's child plays. For example, by taking a turn or by refraining from acting impulsively to let another child achieve an action. Regular engagement of cognitive control across cognitive, social and emotional domains has been proposed to explain the transfer effects of executive functions training on socio-emotional skills (Moreau & Conway, 2014). However, we did not show any clear effects of the training on various socioemotional skills, as measured with self-regulation and socio-emotional competencies questionnaires. One explanation could be relative to our control group activities. Indeed, it could be the case that the control group in the current study benefits from the intervention. To recall, control activities consisted of directed creative sessions in the same conditions as the experimental group. These activities well engaged turn taking, sharing, listening, attention and self-discipline in a social context. The absence of effect could thus mirror the effect of the control group. In the previously mentioned study of Traverso and colleagues, children from the control group were not involved in any intervention frame (Traverso et al., 2015). Indeed, their control group was assessed at the pre and post time but realized classical school activities in their usual classroom context while the experimental group realized the training. In the current study an active control group was used. Analyses show that all children improved after intervention in the executive task. However, it is not possible to disentangle the effect of the development from the effect of the re-test or the effect of the intervention. By considering the improvement for each group independently, we can see that some performances are improved after training in the experimental group, notably the accuracy in the Heart & Flower task. We can point out that in the study of Traverso and colleagues, the accuracy of the Heart & Flower task was increased for the experimental group. Thus, it could be the case than the changes observed in the current study would have been significantly associated with benefits relatively to a passive control group. This interpretation reinforces the interest to foster directed social activities with young children (Adele Diamond & Lee, 2011), suggesting that scaffolding or accompaniment by an adult in a group context (regardless of the activity) involving social abilities could support cognitive control as well as self-regulation development (Liebermann, Giesbrecht, & Müller, 2007; Vygotsky, 1978). It has already been reported to be a close bidirectional relationship between social competencies and cognitive control components (Benavides-Nieto. Et al., 2017). These authors have suggested that intervention should focus on peer interaction to drive benefits both strengthening social skills and executive processes in order to increase school readiness. The widespread effect reported in previous ecological studies soliciting the self-regulation (Deneault et al., 2014; Traverso et al., 2015) on cognitive control

component outcomes, as well as on behavioral adaptation improvement, could find its source in the implementation of regulation competences mobilized in the socio-emotional context (Ursache, Blair, & Raver, 2012). The scaffolding by an adult in a stimulating framework involving routines and motivation could act as the angular stone allowing for intervention benefits. However, this appraisal highlight some methodological limits of the current study, notably imposed by the use in EEG during the assessment. In the present study we tried to assess self-regulation in all of these domains, but with only one measure per domain. Thus futur ecological training studies should consider enlarging both the number of testing tasks and the cognitive dimensions to assess eventual training effects.

5. Conclusion

This study was designed to evaluate the effects of a training stimulating cognitive control in an integrated way assessed through cognitive and socio-emotional measures at the behavioral and neuronal level. Even though we observed that trained children increased the maturity of their play after the training (reflecting greater autonomy and self-regulation in the context of pretend play), these gains did not transfer to other school and family contexts. The present results do not allow us to conclude on beneficial effects of social pretend play on cognitive and brain measurements of cognitive control nor on children's self-regulation and socioemotional skills.

6. Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

7. Authors contributions

NA, CF and AB designed the experiment and the training program. NA and CF carried out the data collection and conducted the training in schools for the experimental groups. RG shared her expertise on EEG data processing and analysis and co-wrote with NA the EEG analysis code. NA and SCF participated to analysis and interpretation of data and NA and CF drafted the manuscript. NA, CF, AB participated in the interpretation of the results and provided critical revisions. All authors approved the final version of the manuscript.

8. Acknowledgments

We thank all the children who participated in the study as well as their parents who gave their consents. We thank all the employees of the three schools where this research was conducted, Villebourbon and Leo Ferre schools. Special thanks to Nathalie Delpoux and Famy Haiart. Thanks also to the Venerque school's, children and employees, for allowing us to conduct the pilot study. We also thank Sabrina Boukoussa and Sylvie Lille who completed their internship as part of this project implementing control activities. Finally we thank Sasskia Brüers for helpfull comments.

The present research was funded by a private donation of a philanthropic not-for-profit foundation to CF (grant number R142068).

9. References

- Adam, N., Blaye, A., Gulbinaite, R., Delorme, A., & Farrer, C. (n.d.). The role of midfrontal theta oscillations in the development of cognitive control during the preschool and school years. *Developmental Science*, 27.
- Astle, D. E., Barnes, J. J., Baker, K., Colclough, G. L., & Woolrich, M. W. (2015). Cognitive Training Enhances Intrinsic Brain Connectivity in Childhood. *Journal of Neuroscience*, 35(16), 6277–6283. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4517-14.2015>
- Bailey, R., & Jones, S. M. (2019). An Integrated Model of Regulation for Applied Settings. *Clinical Child and Family Psychology Review*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s10567-019-00288-y>
- Barnett, L. A. (1984). Research Note: Young Children's Resolution of Distress Through Play. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 23(3), 477–483. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1984.tb00165.x>
- Barnett, L. A., & Kleiber, D. A. (1984). Playfulness and the Early Play Environment. *The Journal of Genetic Psychology*, 144(2), 153–164. <https://doi.org/10.1080/00221325.1984.9923421>
- Barnett, W. S., Jung, K., Yarosz, D. J., Thomas, J., Hornbeck, A., Stechuk, R., & Burns, S. (2008). Educational effects of the Tools of the Mind curriculum: A randomized trial. *Early Childhood Research Quarterly*, 23(3), 299–313. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2008.03.001>
- Bell, M. A., & Wolfe, C. D. (2007). Changes in brain functioning from infancy to early childhood: evidence from EEG power and coherence working memory tasks. *Developmental Neuropsychology*, 31(1), 21–38. https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101_2
- Blair, C., & Raver, C. C. (2014). Closing the Achievement Gap through Modification of Neurocognitive and Neuroendocrine Function: Results from a Cluster Randomized Controlled Trial of an Innovative Approach to the Education of Children in Kindergarten. *PLoS ONE*, 9(11), e112393. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112393>
- Blair, C., & Raver, C. C. (2015). School Readiness and Self-Regulation: A Developmental Psychobiological Approach. *Annual Review of Psychology*, 66(1), 711–731. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015221>
- Bodrova, E. (2008). Make-believe play versus academic skills: a Vygotskian approach to today's dilemma of early childhood education. *European Early Childhood Education Research Journal*, 16(3), 357–369. <https://doi.org/10.1080/13502930802291777>
- Bodrova, E., & Leong, D. J. (2013). International handbook of early childhood education. *Choice Reviews Online*, 30(11), 30-6297-30-6297. <https://doi.org/10.5860/choice.30-6297>
- Botvinick, M., Nystrom, L. E., Fissell, K., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (1999). Conflict monitoring versus selection for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 402(6758), 179–181. <https://doi.org/10.1038/46035>
- Brock, L. L., Rimm-Kaufman, S. E., Nathanson, L., & Grimm, K. J. (2009). The contributions of “hot” and “cool” executive function to children's academic achievement, learning-related behaviors, and engagement in kindergarten. *Early Childhood Research Quarterly*, 24(3), 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2009.06.001>
- Brown, T. T., & Jernigan, T. L. (2012). Brain development during the preschool years. *Neuropsychology Review*. <https://doi.org/10.1007/s11065-012-9214-1>

- Bruchmann, M., Herper, K., Konrad, C., Pantev, C., & Huster, R. J. (2010). Individualized EEG source reconstruction of Stroop interference with masked color words. *NeuroImage*, *49*(2), 1800–1809. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.09.032>
- Bruhn, M., & McKenzie, D. (2009). In Pursuit of Balance: Randomization in Practice in Development Field Experiments. *American Economic Journal: Applied Economics*, *1*(4), 200–232. <https://doi.org/10.1257/app.1.4.200>
- Bryck, R. L., & Fisher, P. a. (2012). Training the brain: Practical applications of neural plasticity from the intersection of cognitive neuroscience, developmental psychology, and prevention science. *American Psychologist*, *67*(2), 87–100. <https://doi.org/10.1037/a0024657>
- Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive function as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, *19*(3), 273–293. <https://doi.org/10.1207/S15326942DN1903>
- Bullins, J., Jha, S., Knickmeyer, R., & Gilmore, J. (2017). Brain development during preschool period. Handbook of Preschool Mental Health Development disorders and treatment.pdf. *Developmental Psychopathology of Early-Onset Disorders*.
- Bunge, S. A., & Wright, S. B. (2007). Neurodevelopmental changes in working memory and cognitive control. *Current Opinion in Neurobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.02.005>
- Buschkuhl, M., Hernandez-Garcia, L., Jaeggi, S. M., Bernard, J. A., & Jonides, J. (2010). Neural effects of short-term training on working memory. *Jaušovec & Jaušovec*.
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Cavanagh, J. F., & Shackman, A. J. (2015). Frontal midline theta reflects anxiety and cognitive control: Meta-analytic evidence. *Journal of Physiology Paris*, *109*(1–3), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2014.04.003>
- Cavanagh, J. F., Zambrano-Vazquez, L., & Allen, J. J. B. (2012). Theta lingua franca: A common mid-frontal substrate for action monitoring processes. *Psychophysiology*, *49*(2), 220–238. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01293.x>
- Chang, Y. K., Tsai, Y. J., Chen, T. T., & Hung, T. M. (2013). The impacts of coordinative exercise on executive function in kindergarten children: An ERP study. *Experimental Brain Research*, *225*(2), 187–196. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3360-9>
- Chaumon, M., Bishop, D. V. M., & Busch, N. A. (2015). A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. *Journal of Neuroscience Methods*, *250*, 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.02.025>
- Chung, K. K., & Silva, A. D. De. (2013). Effects of a Pretend Play Intervention on Executive Functioning Tasks.
- Cohen, M. X. (2017). Comparison of linear spatial filters for identifying oscillatory activity in multichannel data. *Journal of Neuroscience Methods*, *278*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2016.12.016>
- Cohen, M. X., & Cavanagh, J. F. (2011). Single-trial regression elucidates the role of prefrontal theta oscillations in response conflict. *Frontiers in Psychology*, *2*(FEB). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00030>

- Crone, E. A., Bunge, S. A., Van Der Molen, M. W., & Richard Ridderinkhof, K. (2006). Switching between tasks and responses: A developmental study. *Developmental Science, 9*(3), 278–287. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00490.x>
- Dansky, J. L. (1980). Cognitive Consequences of Sociodramatic Play and Exploration Training for Economically Disadvantaged Preschoolers. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 21*(1), 47–58. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1980.tb00015.x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- de Chantal, P. L., & Markovits, H. (2017). The capacity to generate alternative ideas is more important than inhibition for logical reasoning in preschool-age children. *Memory and Cognition, 45*(2), 208–220. <https://doi.org/10.3758/s13421-016-0653-4>
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods, 134*(1), 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Deneault, J., Lefebvre, O., & Rousseau, C. (2014). Le jeu symbolique permet-il de se «préparer à l'école»? Les effets des ateliers d'expression Jeu dans le sable sur le développement d'enfants de 4 à 6 ans. TT - Can symbolic play improve school readiness? Impact of sandplay expression workshops on the de. *Revue de Psychoéducation, 43*(2), 299–321.
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). THE EARLY YEARS: Preschool Program Improves Cognitive Control. *Science, 318*(5855), 1387–1388. <https://doi.org/10.1126/science.1151148>
- Diamond, Adele, & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science (New York, N.Y.), 333*(6045), 959–964. <https://doi.org/10.1126/science.1204529>
- Diamond, Adele, & Ling, D. S. (2016a). 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. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Diamond, Adele, & Ling, D. S. (2016b). 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. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Diamond, Adele, Steven Barnett, W., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool Program Improves Cognitive Control NIH Public Access. *Science, 318*(5855), 1387–1388. Retrieved from www.sciencemag.org/cgi/content/full/318/5855/1387/DC1
- Dias, N. M., & Seabra, A. G. (2016). Intervention for executive functions development in early elementary school children: Effects on learning and behavior. *Educational Psychology, 34*(0)(August). <https://doi.org/10.1080/01443410.2016.1214686>
- Dowsett, S. M., & Livesey, D. J. (2000). The development of inhibitory control in preschool children: Effects of Idquoexecutive skillsrdquo training. *Developmental Psychobiology, 36*(2), 161–174. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2302\(200003\)36:2<161::AID-DEV7>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(200003)36:2<161::AID-DEV7>3.0.CO;2-0)
- Dumas, J. E., LaFrenière, P. J., Capuano, F., & Duming, P. (1997). Profil Socio-Affectif (PSA):

Play intervention does not benefit more the Cognitive Control Development than Directed Social Activities: a multidimensional approach from midfrontal theta oscillations to behavioral measures in Kindergarten children

Évaluation des compétences sociales et des difficultés d'adaptation des enfants de 2 u ans à 6 ans.

- Dunn, L. M., & Dunn, L. M. (1997). *PPVT-III: Peabody picture vocabulary test*. American Guidance Service.
- Fisher, E. P. (1992). The impact of play on development: A meta-analysis. *Play & Culture*, 5(2), 159–181.
- Galyer, K. T., & Evans, I. M. (2001). Pretend play and the development of emotion regulation in preschool children. *Early Child Development and Care*, 166(1), 93–108. <https://doi.org/10.1080/0300443011660108>
- Gulbinaite, R., van Rijn, H., & Cohen, M. X. (2014). Fronto-parietal network oscillations reveal relationship between working memory capacity and cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00761>
- Gulbinaite, R., van Viegen, T., Wieling, M., Cohen, M. X., & VanRullen, R. (2017). Individual Alpha Peak Frequency Predicts 10 Hz Flicker Effects on Selective Attention. *The Journal of Neuroscience*, 37(42), 10173–10184. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1163-17.2017>
- Heckman, J. J., & Masterov, D. V. (2007). The Productivity Argument for Investing in Young Children. *Review of Agricultural Economics*, 29(3), 446–493. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9353.2007.00359.x>
- Holmes, J., Gathercole, S. E., & Dunning, D. L. (2009). Adaptive training leads to sustained enhancement of poor working memory in children. *Developmental Science*, 12(4), 1–7. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00848.x>
- Hsu, N. S., & Jaeggi, S. M. (2013). The Emergence of Cognitive Control Abilities in Childhood. In *Current topics in behavioral neurosciences* (Vol. 16, pp. 149–166). https://doi.org/10.1007/7854_2013_241
- Karpov, J. V., & Karpov, Y. V. (2005). *The Neo-Vygotskian Approach to Child Development*. Cambridge University Press. Retrieved from <https://books.google.fr/books?id=fyePNHYB31cC>
- Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(7), 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.05.002>
- Kloo, D., & Perner, J. (2003). Training Transfer Between Card Sorting and False Belief Understanding: Helping Children Apply Conflicting Descriptions. *Child Development*, 74(6), 1823–1839. <https://doi.org/10.1046/j.1467-8624.2003.00640.x>
- Kopp, B., Rist, F., & Mattler, U. (1996). N200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control. *Psychophysiology*, 33, 282–294.
- Krafft, K. C., & Berk, L. E. (1998). Private speech in two preschools: Significance of open-ended activities and make-believe play for verbal self-regulation. *Early Childhood Research Quarterly*, 13(4), 637–658. [https://doi.org/10.1016/s0885-2006\(99\)80065-9](https://doi.org/10.1016/s0885-2006(99)80065-9)
- Krafnick, A. J., Flowers, D. L., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2011). Gray matter volume changes following reading intervention in dyslexic children. *NeuroImage*, 53(3), 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.062>
- Landry, S., Pagé, P., & Bouchard, C. (2014). Jeu, apprentissage et développement de l'enfant : que nous apprend la perspective historico-culturelle? In *Le jeu en contextes éducatifs pendant la*

Play intervention does not benefit more the Cognitive Control Development than Directed Social Activities: a multidimensional approach from midfrontal theta oscillations to behavioral measures in Kindergarten children

petite enfance (pp. 1–14). ACFAS 2013.

- Leong, D. J., & Bodrova, E. (2012). Assessing and scaffolding make-believe play. *YC Young Children, 67*(1), 28–34.
- Liebermann, D., Giesbrecht, G. F., & Müller, U. (2007). Cognitive and emotional aspects of self-regulation in preschoolers. *Cognitive Development, 22*(4), 511–529. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2007.08.005>
- Liu, Z. X., Woltering, S., & Lewis, M. D. (2014). Developmental change in EEG theta activity in the medial prefrontal cortex during response control. *NeuroImage, 85*, 873–887. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.054>
- Marjanovic Umek, L., & Lewnik Musek, P. (2001). Symbolic play: Opportunities for cognitive and language development in preschool settings. *International Journal of Phytoremediation, 21*(1), 55–64. <https://doi.org/10.1080/09575140125077>
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods, 44*(2), 314–324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- McClelland, M. M., Acock, A. C., Piccinini, A., Rhea, S. A., & Stallings, M. C. (2013). Relations between preschool attention span-persistence and age 25 educational outcomes. *Early Childhood Research Quarterly, 28*(2), 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2012.07.008>
- McKenzie, D. (2011). How Can We Learn Whether Firm Policies Are Working in Africa? Challenges (and Solutions?) For Experiments and Structural Models†. *Journal of African Economies, 20*(4), 600–625. <https://doi.org/10.1093/jae/ejr024>
- Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., ... Caspi, A. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 108*(7), 2693–2698. <https://doi.org/10.1073/pnas.1010076108>
- Moreau, D., & Conway, A. R. A. (2014). The case for an ecological approach to cognitive training. *Trends in Cognitive Sciences, 18*(7), 334–336. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.03.009>
- Morgan, P. L., Farkas, G., Wang, Y., Hillemeier, M. M., Oh, Y., & Maczuga, S. (2019). Executive function deficits in kindergarten predict repeated academic difficulties across elementary school. *Early Childhood Research Quarterly, 46*, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.06.009>
- Moriguchi, Y. (2014). The early development of executive function and its relation to social interaction: a brief review. *Frontiers in Psychology, 5*(April), 388. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00388>
- Nelson, T. D., Nelson, J. M., James, T. D., Clark, C. A. C., Kidwell, K. M., & Espy, K. A. (2017). Executive control goes to school: Implications of preschool executive performance for observed elementary classroom learning engagement. *Developmental Psychology, 53*(5), 836–844. <https://doi.org/10.1037/dev0000296>
- O’Shaughnessy, T. E., Lane, K. L., Gresham, F. M., & Beebe-Frankenberger, M. E. (2003). Children Placed at Risk for Learning and Behavioral Difficulties: Implementing a School-Wide System of Early Identification and Intervention. *Remedial and Special Education, 24*(1), 27–35. <https://doi.org/10.1177/074193250302400103>

- Orr, E., & Geva, R. (2015). Symbolic play and language development. *Infant Behavior and Development, 38*, 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2015.01.002>
- Pellegrini, A. D., Dupuis, D., & Smith, P. K. (2007). Play in evolution and development. *Developmental Review, 27*(2), 261–276. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2006.09.001>
- Pierucci, J. M., O'Brien, C. T., McInnis, M. A., Gilpin, A. T., & Barber, A. B. (2014). Fantasy orientation constructs and related executive function development in preschool: Developmental benefits to executive functions by being a fantasy-oriented child. *International Journal of Behavioral Development, 38*(1), 62–69. <https://doi.org/10.1177/0165025413508512>
- Pietto, M. L., Kamienkowski, J. E., & Lipina, S. J. (2017). Electrophysiological Approaches in the Study of the Influence of Childhood Poverty on Cognition. In A. Ibáñez, L. Sedeño, & A. M. Garcia (Eds.), *Neuroscience and Social Science* (pp. 349–381). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68421-5_15
- Ponitz, C. C., McClelland, M. M., Matthews, J. S., & Morrison, F. J. (2009). A structured observation of behavioral self-regulation and its contribution to kindergarten outcomes. *Developmental Psychology, 45*(3), 605.
- Pozuelos, J. P., Combita, L. M., Abundis, A., Paz-Alonso, P. M., Conejero, Á., Guerra, S., & Rueda, M. R. (2019). Metacognitive scaffolding boosts cognitive and neural benefits following executive attention training in children. *Developmental Science, 22*(2), 0–2. <https://doi.org/10.1111/desc.12756>
- Qu, L. (2011). Two is better than one, but mine is better than ours: Preschoolers' executive function during co-play. *Journal of Experimental Child Psychology, 108*(3), 549–566. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.010>
- R Core Team. (2014). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.r-project.org/>
- Raven, J. C. (1947). Raven's progressive matrices test. London: HK Lewis.
- Reynolds, A. J., Temple, J. A., & Ou, S.-R. (2010). Preschool education, educational attainment, and crime prevention: Contributions of cognitive and non-cognitive skills. *Children and Youth Services Review, 32*(8), 1054–1063. <https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2009.10.019>
- Röthlisberger, M., Neuenschwander, R., Cimeli, P., Michel, E., & Roebbers, C. M. (2012). Improving executive functions in 5- and 6-year-olds: Evaluation of a small group intervention in prekindergarten and kindergarten children. *Infant and Child Development, 21*, 411–429. <https://doi.org/10.1002/icd>
- Roy, A., Fournet, N., Roulin, J. L., & Le Gall, D. (2013). BRIEF-Inventaire d'Evaluation Comportementale des Fonctions Exécutives (Adaptation Française de Gioia GA, Isquith PK, Guy SC, Kenworthy L). Paris: Hogrefe France Editions.
- Rueda, M. R., Checa, P., & Combita, 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*(SUPPL. 1), S192–S204. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.004>
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P., & Posner, M. I. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia, 42*(8), 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>

- Russ, S. W., & Kaugars, A. S. (2001). Emotion in Children's Play and Creative Problem Solving. *Creativity Research Journal, 13*(2), 211–219. https://doi.org/10.1207/S15326934CRJ1302_8
- Russ, S. W., & Schafer, E. D. (2006). Affect in Fantasy Play, Emotion in Memories, and Divergent Thinking. *Creativity Research Journal, 18*(3), 347–354. https://doi.org/10.1207/s15326934crj1803_9
- Seja, A. L., & Russ, S. W. (1999). Children's fantasy play and emotional understanding. *Journal of Clinical Child Psychology, 28*(2), 269–277. https://doi.org/10.1207/s15374424jccp2802_13
- Sektman, M., McClelland, M. M., Acock, A., & Morrison, F. J. (2010). Relations between early family risk, children's behavioral regulation, and academic achievement. *Early Childhood Research Quarterly, 25*(4), 464–479. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2010.02.005>
- Strobach, T., Salminen, T., Karbach, J., & Schubert, T. (2014). Practice-related optimization and transfer of executive functions: A general review and a specific realization of their mechanisms in dual tasks. *Psychological Research, 78*(6), 836–851. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0563-7>
- Thibodeau, R. B., Gilpin, A. T., Brown, M. M., & Meyer, B. A. (2016). The effects of fantastical pretend-play on the development of executive functions: An intervention study. *Journal of Experimental Child Psychology, 145*, 120–138. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.01.001>
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Nutley, S. B., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science, 12*(1), 106–113. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x>
- Tominey, S. L., & McClelland, M. M. (2011). Red Light, Purple Light: Findings From a Randomized Trial Using Circle Time Games to Improve Behavioral Self-Regulation in Preschool. *Early Education & Development, 22*(3), 489–519. <https://doi.org/10.1080/10409289.2011.574258>
- 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*(April), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00525>
- Umek, L. M., Musek, P. L., Pecjak, S., & Kranjc, S. (1999). Symbolic play as a way of development and learning of preschool children in preschool institutions. *International Journal of Phytoremediation, 2*(1), 35–44. <https://doi.org/10.1080/13502939985208311>
- Ursache, A., Blair, C., & Raver, C. C. (2012). The Promotion of Self-Regulation as a Means of Enhancing School Readiness and Early Achievement in Children at Risk for School Failure. *Child Development Perspectives, 4*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00209.x>
- Vygotsky, L. S. (1978). Interaction between learning and development. In S. A. Books (Ed.), *Readings on the Development of Children* (Gauvain & pp. 34–40). New-York.
- Weisberg, D. S., Ilgaz, H., Hirsh-Pasek, K., Golinkoff, R., Nicolopoulou, A., & Dickinson, D. K. (2015). Shovels and swords: How realistic and fantastical themes affect children's word learning. *Cognitive Development, 35*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2014.11.001>
- Whitebread, D., Coltman, P., Jameson, H., & Lander, R. (2016). Guest editorial: Play and learning in educational settings. *Educational Child Psychology, 26*(2), 90. <https://doi.org/10.1007/s00066-015-0887-2>
- Wiebe, S. a., Sheffield, T., Nelson, J. M., Clark, C. a C., Chevalier, N., & Espy, K. A. (2011). The

Play intervention does not benefit more the Cognitive Control Development than Directed Social Activities: a multidimensional approach from midfrontal theta oscillations to behavioral measures in Kindergarten children

structure of executive function in 3-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 436–452. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008>

Woolley, J. D., & Tullos, A. (2008). Imagination and Fantasy. In M. M. Haith & J. B. B. T.-E. of I. and E. C. D. Benson (Eds.) (pp. 117–127). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012370877-9.00081-5>

	A : Plan	B : Rôles	C : Accessoires	E : Langage	F : Scénario
1	Ne planifie pas pendant le jeu	N'a pas de rôle	Joue avec des objets considérés comme des objets	Utilise peu le langage	Ne crée pas de scénario. Peut copier ce que le professeur fait et dit ou suit les directives si le script est simple et répétitif
2	Ne planifie pas pendant le jeu	Agit d'abord et décide du rôle ensuite. Les règles ne sont pas révélées	Joue avec des objets utilisés comme des accessoires. Le jeu avec un accessoire renvoie à un rôle.	Utilise le langage pour décrire les actions	Crée un scénario stéréotypé avec des comportements limités. Peut incorporer des rôles et actions 'modèles' avec de l'aide
3	Planifie les rôles, les actions sont nommées avant d'être jouées	A des rôles définis dont les règles peuvent être violées	A besoin d'un accessoire pour son rôle	Utilise le langage pour décrire les actions et les rôles	Joue à des scénarios familiers. Accepte de nouvelles idées de scripts
4	Planifie chaque scénario à l'avance	A des rôles complexes et multiples	Utilise des accessoires symboliques ou imaginaires	Utilise le langage pour décrire les actions et les rôles. Utilise un discours propre au rôle.	Joue à une série de scénarios non coordonnés entre eux.
5	Planifie des thèmes ou scénarios élaborés, des rôles complexes, et passe plus de temps à planifier qu'à jouer	Peut jouer plusieurs rôles simultanément. Les rôles ont des relations sociales.	Peut prétendre avoir un accessoire plutôt que de l'avoir. N'a pas besoin d'un accessoire pour rester dans le rôle. Les objets peuvent avoir un rôle	Utilise le langage pour délimiter le scénario, les rôles et les actions. Le langage des livres est intégré au discours des personnages.	Joue à une série de scénarios coordonnés qui sont dépendants du scénario précédent et des envies de chacun. Utilise des histoires et thèmes issus d'histoire

IV. Discussion générale

A. RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA THÈSE

Cette thèse s'est intéressée au développement du contrôle cognitif au moyen d'une tâche de conflit mettant en jeu de la gestion d'interférence. L'objectif était de distinguer à l'échelle de l'activité neuronale les modifications consécutives d'une part, au développement classique survenant au cours de l'enfance ; et d'autre part, à la mise en place d'un entraînement lors de la période préscolaire.

Ce travail reposait sur deux grands objectifs ; le premier étant d'étudier dans quelle mesure un entraînement écologique, basé sur le jeu de faire semblant, peut-il être bénéfique au développement du contrôle cognitif. Puis, le cas échéant, statuer sur la nature des bénéfices tant au niveau comportemental (mesures issues d'observation et de questionnaires), cognitif (mesures issues de tâches neuropsychologiques) que cérébral (changement d'amplitude ou de latence de l'activité oscillatoire thêta en zone fronto-centrale lié à la gestion de différents types d'interférence). La question principale de cette thèse était de savoir si les éventuels changements de l'activité neuro-oscillatoire observés suite à la mise en place d'un entraînement écologique sont similaires aux progrès développementaux ? Ceci dans le but de comprendre comment l'entraînement agit sur le développement des processus impliqués dans le contrôle cognitif. Dans une perspective plus appliquée ces travaux possèdent également un intérêt clinique quant à l'identification d'une méthode de remédiation efficace et aisément admissible aux déficits exécutifs. Peut-on envisager l'entraînement comme un support permettant de stimuler et/ou compenser un retard de développement des traitements neurocognitifs impliqués dans le contrôle cognitif ?

Ainsi nous avons mis en place deux études complémentaires. Une première étude transversale a permis d'observer les changements cognitifs et cérébraux associés à la réalisation d'une tâche d'interférence sur un échantillon d'enfants d'âge préscolaire et scolaire (de 4 à 8 ans). L'objectif était de mettre en évidence

les éventuelles modifications des processus de traitement en jeu dans la gestion de différentes modalités de conflit survenant entre la période préscolaire et la période scolaire au moyen d'une tâche mobilisant le contrôle cognitif.

Une seconde étude réalisée sur un échantillon d'enfants d'âge préscolaire (de 4 à 6 ans) a permis d'observer les effets consécutifs à un entraînement écologique du contrôle cognitif au moyen d'une évaluation avant et après intervention. Il s'agissait de tester l'intérêt pour le développement du contrôle cognitif, d'une activité d'entraînement basée sur le jeu de faire semblant en contexte social auprès d'enfants d'âge préscolaire. Le choix de ce support d'entraînement s'appuie sur des assises théoriques (Berk & Meyers, 2013; Blair & Diamond, 2008) et empiriques (Diamond & Lee, 2011) qui soulignent l'implication du contrôle cognitif au cours du jeu de faire semblant et qui mettent en évidence la capacité de ce type d'activités à générer des effets de transfert sur l'autorégulation et à avoir un impact sur la réussite scolaire. Cette deuxième étude devait permettre de constater d'éventuels bénéfices de l'entraînement sur le contrôle cognitif au niveau comportemental, cognitif et neuronal, et d'interpréter ces bénéfices au regard des résultats obtenus lors de la première étude afin d'établir si les éventuels effets de cet entraînement étaient similaires aux changements développementaux observés dans l'étude transversale.

L'efficacité du contrôle cognitif a été appréhendée au travers de la gestion d'interférence dans une approche développementale.

L'étude a cherché à identifier les mécanismes neuronaux sous-jacents à l'implémentation du contrôle cognitif à deux étapes de développement. Est-ce que le rythme thêta pourrait jouer un rôle de mécanisme neuronal général de coordination des processus impliqués dans différents traitements cognitifs associés à la mobilisation de fonctions exécutives qui ne sont pas encore clairement identifiables ? Pour cela, nous avons utilisé une tâche d'interférence pour étudier la mobilisation du contrôle cognitif lors de la gestion de conflit. Cette tâche implique plusieurs types d'interférences. Ces différentes conditions d'interférence présentent des niveaux de complexité de traitement variés permettant d'étudier de manière spécifique les processus impliqués dans

l'implémentation du contrôle cognitif (i.e. inhibition de réponse automatique, alternance de task-set). Le choix de cette approche d'analyse au niveau des processus du contrôle cognitif, plutôt qu'au niveau des fonctions exécutives s'ancre dans une approche développementale au cours d'une période d'âge où les trois fonctions de base classiquement étudiées (inhibition, flexibilité et mémoire de travail) ne sont pas clairement identifiées (Lee et al., 2013).

Un contrôle cognitif efficace se caractérise par une meilleure gestion du conflit qui se traduit par une meilleure évaluation des besoins de régulation et une implémentation plus efficace des processus cognitifs nécessaires à la gestion d'interférence (Ridderinkhof et al., 2004). Un contrôle cognitif plus efficace se concrétise par une réduction des temps de réponse (TR), une augmentation des pourcentages de réponses correctes (PRC) ainsi que par un ajustement plus dynamique de l'amplitude du rythme neuro-oscillatoire thêta en région fronto-centrale (mesure obtenue au moyen de la composante thêta identifiée en zone fronto-centrale dénommée par l'acronyme MFT) face à une interférence (Braver et al., 2003; Crone, Bunge, et al., 2006; Crone, Donohue, et al., 2006; Davidson et al., 2006). Quatre conditions ont été étudiées : 1) une condition d'interférence nulle, condition que nous n'associons à aucune interférence et que nous utilisons comme base de référence (précédemment nommée cC). Dans cette condition le stimulus de l'essai courant est identique à celui rencontré dans l'essai précédent, n'impliquant ainsi aucun changement de règle. De plus, le stimulus est compatible avec la réponse, c'est-à-dire que la dimension saillante (le côté d'apparition) sur laquelle s'appuie le traitement du stimulus n'a pas besoin d'être inhibée ; 2) une condition d'interférence Stimulus-Réponse, dans cette condition la dimension saillante du stimulus de l'essai courant est incompatible avec la latéralisation de la réponse, tout comme lors de l'essai précédent. Cela implique de devoir inhiber la dimension saillante non pertinente du stimulus, au profit de la dimension non saillante permettant de fournir une réponse adaptée par rapport à une règle active (précédemment nommée il) ; 3) une condition d'interférence de task-set seule. Pour rappel le task-set correspond aux paramètres (représentations et règles) associés à un stimulus. L'interférence de task-set (reflétée par un coût d'alternance) implique d'inhiber le task-set actif afin de rendre accessible un autre task-set latent (précédemment nommée iC); 4) une condition d'interférence de task-set

combinée à une interférence Stimulus-Réponse, cette condition réunit les deux types d'interférences elle nécessite donc d'inhiber le task-set actif et d'inhiber également la tendance de réponse automatique associée à l'incompatibilité du stimulus et de la réponse (précédemment nommée CI).

B. IDENTIFICATION DE MARQUEURS DU DÉVELOPPEMENT LIÉ À L'ÂGE

Une première étude transversale a permis d'appréhender les effets de l'âge (identifiés au travers des TR, du PRC et de l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire thêta en zone fronto-centrale (MFT) lié(e)s aux différentes conditions de conflit et latence du pic d'amplitude moyen de la MFT). Cette étude comparait les résultats obtenus par deux groupes d'âges 4-6 ans et 6-8 ans. Ces sous-groupes se distinguent du fait de leur âge mais aussi par leur implication dans les apprentissages fondamentaux à partir de l'entrée à l'école élémentaire qui représentent un contexte propice à la sollicitation et au développement des FEs chez les enfants d'âge scolaire.

Concernant les performances cognitives, les effets liés à l'âge s'apparentent à ce qui a déjà été reporté dans la littérature au travers de tâches similaires (Crone, Bunge, et al., 2006; Davidson et al., 2006). L'interférence Stimulus-Réponse est mieux gérée avec l'âge au niveau de la rapidité de la réponse, indiquant une meilleure inhibition de réponse automatique (DeSoto et al., 2001; Wright & Diamond, 2014). Cependant, le PRC ne laisse pas apparaître de différence entre les essais sans interférence et les essais générant une interférence Stimulus-Réponse. Une amélioration de la performance suite à la répétition de task-set est aussi reportée, reflétant de meilleures capacités de maintien actif donnant lieu à un effet facilitateur lié à la répétition de task-set (Gratton et al., 1992). En revanche, l'interférence de task-set (changement de règle entre deux essais consécutifs) engendre pour tous les enfants une augmentation du TR et une dégradation de la précision sur l'essai courant. Ce coût d'alternance, est un effet classique reporté à la fois dans la littérature chez l'enfant (Cepeda et al., 2001; Crone, Bunge, et al., 2006; Wright & Diamond,

2014; Zelazo et al., 2003), mais aussi chez l'adulte (Lorsbach & Reimer, 2008; Monsell et al., 2000).

Chez les enfants d'âge scolaire, un coût d'alternance supplémentaire intervient lors d'alternance depuis un essai incompatible vers un essai compatible. La condition d'interférence de task-set seule implique fortement la fonction d'inhibition (e.g. inhibition de task-set & l'inhibition de l'inhibition mise en place afin de dépasser l'association Stimulus-Réponse). La hausse du coût d'alternance généré pour les enfants d'âge scolaire correspond à un effet consécutif du développement conjoint du maintien actif et de l'inhibition de réponse automatique.

L'amplitude de la MFT est modulée dans toutes les conditions d'interférence par rapport à la condition de base et pour chacun des groupes d'âge. Cela indique que la MFT intervient bien dans l'implémentation du contrôle cognitif lors de la tâche. Pour les enfants les plus jeunes, des différences entre les conditions révèlent que l'amplitude de la MFT est accrue dans les conditions sollicitant davantage de contrôle cognitif (interférence de task-set versus interférence nulle). Cela montre également un rôle de l'amplitude de la MFT dans la gestion de conflit, avec une amplitude modulée en fonction de l'intensité de l'interférence et des processus cognitifs impliqués dans la résolution de l'interférence. Chez les enfants d'âge scolaire, on observe une amplitude de la MFT similaire dans toutes les conditions d'interférence. Un effet de l'âge intervient également sur la latence du pic d'amplitude de la MFT, soulignant qu'à l'âge scolaire, les traitements liés au contrôle cognitif sont plus précoces qu'à l'âge préscolaire.

L'absence de différence d'amplitude de la MFT entre les conditions d'interférences (notamment entre l'interférence nulle et les autres conditions d'interférence) chez les enfants les plus âgés suggère que ces derniers mettent en place leur contrôle en prenant en compte l'incertitude générée par la tâche quant à une éventuelle interférence à venir. Il semble, en revanche, que ce ne soit pas le cas des enfants plus jeunes qui manifestent une amplitude de la MFT significativement supérieure en cas d'interférence par rapport à en cas d'interférence nulle. L'activité neuro-oscillatoire thêta enregistrée pour les

enfants d'âge préscolaire proviendrait donc du cortex cingulaire antérieur (CCA) qui intègre les conflits sur une courte échelle de temps pour signaler le besoin immédiat d'un contrôle en réaction à un conflit (Botvinick et al., 2001). Les essais sans interférence montrent une amplitude moindre par rapport aux essais avec interférence. On note cependant que l'augmentation de l'amplitude pour la condition d'interférence stimulus-Réponse seule (essais il) n'est que marginale. Cela suggère que cette interférence est moins complexe (comme le soulignent les performances comportementales avec une réduction du TR mais pas du PRC) que les interférences de task-set. Cet effet de facilitation, lié à la répétition, correspond à une réduction de l'effet d'incompatibilité généré par une interférence Stimulus-Réponse lorsque l'essai précédent était également incompatible (i.e. essais il, voir Iani et al., 2014; Smulders et al., 2005). Cet effet est interprété comme une adaptation au conflit dans la théorie de supervision du conflit (Botvinick et al., 2001). On l'observe au niveau neuronal au travers d'une amplitude de la MFT réduite lors d'essais incompatibles suivant un essai incompatible (chez l'adulte : (Cohen & Ridderinkhof, 2013; Larson et al., 2012; Töllner et al., 2017) ; chez l'enfant : (Wendelken et al., 2012).

Pour les enfants plus matures, il se pourrait que l'amplitude de la MFT (qui ne varie pas en fonction des conditions d'interférence) reflète l'activité cumulée de plusieurs mécanismes. Un mécanisme de régulation du conflit comme chez les plus petits, c'est-à-dire l'activation et l'implémentation des processus de contrôle cognitif pour ajuster le comportement par rapport au but, mais aussi un mécanisme de supervision. En effet, l'absence de différence de niveau d'amplitude en fonction des différentes conditions d'interférence (notamment la condition d'interférence nulle), suggère la mise en œuvre d'un mécanisme de supervision du conflit permettant de signaler un besoin d'ajustement du niveau de contrôle cognitif (Botvinick et al., 2001). Cet ajustement est permis par le CCA qui, au cours du développement, peut intégrer une interférence répétée sur une plus longue période pour signaler la nécessité de mettre en place un contrôle de façon anticipée en prévision d'un conflit à venir (De Pisapia & Braver, 2006). Le DLPFC est alors activé de manière prolongée et/ou anticipée intervenant dans le maintien actif (des représentations de la tâche, du task-set latent) permettant de faciliter le traitement ultérieur en cas de forte demande

cognitive (Braver, 2012). Cette interprétation est soutenue par les résultats de Cavanagh & Shackman (2015) sur le mécanisme de contrôle adaptatif (Cavanagh & Shackman, 2015). Le contrôle adaptatif implique la réalisation d'un besoin de contrôle au travers d'une rétro-surveillance sur la tâche et ses propres performances (Cavanagh & Shackman, 2015). Le contrôle adaptatif nécessite qu'un agent établisse des attentes et surveille les déviations (erreurs de prédiction) ou les déviations potentielles (conflits) pour définir le besoin de contrôle. L'amplitude de la MFT semble refléter l'activité cumulée de ces processus, agissant avec un rôle de mécanisme neurophysiologique de réalisation du besoin de contrôle lors d'un constat d'incertitude par rapport à la performance propre d'un sujet dans une tâche (Shackman et al., 2011; Shenhav et al., 2013). Par ailleurs, ces résultats pourraient également être expliqués par le modèle des deux mécanismes de Braver (Braver, 2012). Cette interprétation reste spéculative dans la mesure où nous n'avons pas manipulé les paramètres nécessaires à l'implémentation spécifique d'un contrôle réactif (engagé en réponse d'une demande) versus proactif (engagé en amont de toute demande). Interprétés au regard du modèle des deux mécanismes nos résultats suggèreraient qu'au cours de la tâche les enfants d'âge préscolaire engageraient leur contrôle de manière réactive en fonction de l'interférence rencontrée et de l'intensité du conflit subsidiaire. En revanche, chez les enfants d'âge scolaire le contrôle serait engagé de façon proactive, c'est à dire que les enfants engageraient leur contrôle cognitif dans la tâche pour anticiper un éventuel conflit à venir (Braver & Ruge, 2006).

Cette démarche originale nous permet d'identifier des marqueurs du développement de processus de traitement sous-jacents au contrôle cognitif au travers d'une même tâche. L'intérêt de cette approche est de pouvoir mieux comprendre comment les entraînements non-basés sur les processus, impactent les mécanismes neuronaux impliqués dans le contrôle cognitif. Dans l'hypothèse où l'entraînement serait efficace, est-ce que les bénéfices obtenus ou changements constatés au niveau neuronal seraient cohérents avec des effets de développement observés avec l'âge ?

C. APPLICATION DES MARQUEURS DÉVELOPPEMENTAUX DANS L'ÉVALUATION D'UN D'ENTRAÎNEMENT

Nous avons implémenté un protocole d'entraînement du contrôle cognitif impliquant un groupe contrôle et un groupe expérimental dans une intervention réalisée sur 4 mois. Le groupe expérimental était soumis à des sessions de jeu de faire semblant en groupe, ritualisées, et sous l'encadrement d'un adulte. Le groupe contrôle réalisait dans les mêmes conditions des activités créatives (dessin, collage, pâte à modeler). L'intervention a été évaluée avant et après sa réalisation, au moyen de la même tâche que celle utilisée dans l'étude transversale ; une tâche permettant le recueil de mesures cognitives et neuronales liées à l'implémentation du contrôle cognitif dans différentes conditions d'interférence, ainsi qu'au travers d'autres mesures d'autorégulation, de compétences socio-émotionnelles, d'intelligence fluide et de compréhension du vocabulaire.

Dans cette étude, les bénéfices directs de l'entraînement s'évaluent en termes de capacité à mieux s'investir dans le jeu de faire semblant. Plus précisément, dans notre méthode, nous avons mesuré la maturité du jeu au moyen d'une grille d'évaluation (en annexe de ce manuscrit) renseignant sur différents aspects : l'utilisation des accessoires, la mise en place d'un scénario, l'utilisation du langage et la richesse des rôles tenus (Leong & Bodrova, 2012). La maturité du jeu repose sur les compétences d'autorégulation, plus cette maturité, évaluée sur différents points, est grande, plus ces compétences sont mobilisées. Après l'intervention, seul le groupe entraîné manifeste une maturité du jeu améliorée. Ceci suggère que l'entraînement a permis au groupe expérimental de mieux mettre en œuvre ses compétences d'autorégulation lors du jeu de faire semblant. Cependant, les échelles d'évaluation comportementales ne nous ont pas permises de mettre en avant un éventuel bénéfice en termes d'autorégulation comportementale ou d'amélioration des compétences socioaffectives à la suite de l'entraînement. De même, au niveau du fonctionnement exécutif, aucun bénéfice n'a pu être mis en évidence au moyen des différents outils d'évaluation utilisés. Enfin, l'analyse de la latence de la réponse neuronale thêta et de son amplitude en fonction des différentes

conditions d'interférences ne révèlent, eux non plus, aucun effet lié à l'entraînement. Aux vues de ces résultats, nous pouvons conclure que nos conditions d'évaluation n'ont pas permises de mettre en évidence la plus-value, en termes d'amélioration des compétences de contrôle cognitif chez les enfants d'âge préscolaire, d'une intervention centrée sur le jeu symbolique, décorrélée de tout autre modalité d'intervention (i.e. coaching parental, entraînement de la métacognition, ...) comparativement à une intervention réalisée via un autre support dans les mêmes conditions. Nos résultats suggèrent plutôt que le jeu de faire semblant serait un support pertinent parmi d'autres (e.g. activités créatives en groupe encadrées par un adulte). Cette étude conforterait donc les précédentes conclusions de Lillard et collaborateurs qui, contrairement à Vygotsky, avance que le jeu de faire semblant ne serait pas l'activité – essentielle – au développement du contrôle cognitif (Lillard et al., 2012; Vygotsky, 1933).

- › La première question que l'on peut se poser est la suivante : n'y a-t-il eu aucun bénéfice de cet entraînement ou bien n'a-t-on pas été en mesure de les identifier au moyen des outils et mesures utilisés ?

L'activité neuro-oscillatoire MFT est considérée comme la "lingua franca" (voie directe) permettant de mettre en œuvre le contrôle cognitif dès lors que i) les processus automatisés ne sont pas capables de fournir une réponse adaptée, ou que ii) un besoin accru de contrôle est constaté par une capacité de surveillance (Cavanagh et al., 2012), et cela dans divers contextes cognitifs ou émotionnels (Shackman et al., 2011). Notre première étude montre l'intérêt d'utiliser cette mesure dans l'évaluation du développement du contrôle cognitif. Cependant face à l'absence de différence dans le cadre de l'évaluation de l'entraînement, nous pouvons remettre en question la pertinence de cette mesure sur des changements plus fins. Peut-être qu'une autre mesure de l'activité neuronale aurait permis de mieux appréhender les éventuels changements générés. La mesure de la connectivité effective s'avère être une piste à envisager. Il s'agit de la mesure de l'influence causale exercée par l'activité d'un système neuronal sur un autre, de manière directe ou indirecte. Il a été proposé qu'un retard de maturation de régions corticales clés (i.e. région

cingulaire) puisse être en cause dans les difficultés exécutives chez des sujets au développement typique (Vincent et al., 2008) ou atypique (trouble du spectre autistique : Doesburg et al., 2013; Kikuchi et al., 2013 ; TDA/H : Murias et al., 2007). Cette hypothèse soutient le modèle de supervision de Botvinick (Botvinick et al., 2001) en sous-tendant que dès lors que le CCA est immature il ne permet pas de mettre en œuvre les mécanismes de régulation et d'évaluation dont il a la charge et ainsi, de recruter les réseaux nécessaires à la réalisation d'une action non-familière (i.e. conflit). Il peut ainsi en résulter de la sur-connectivité intra-corticale entre les hémisphères frontaux (Doesburg et al., 2013), de même que de la sous-connectivité inter-corticale entre les aires frontales et pariétales (Fries, 2005), soit une communication cérébrale non optimisée (Courchesne & Pierce, 2005). L'étude des ERPs (potentiels évoqués) est aussi une piste à envisager pour explorer les éventuels bénéfices d'un entraînement sur le contrôle cognitif (Cavanagh & Frank, 2014; Pozuelos, Combita, Abundis, Paz-Alonso, et al., 2019; Rueda et al., 2012). La N2 est une composante ERP survenant en région fronto-centrales autour de 200ms après induction d'un conflit (i.e. Flanker, Go-NoGo). En fonction de la tâche de conflit utilisée la modulation d'amplitude de l'ERP liée au conflit peut se produire dans des fenêtres temporelles postérieures à celle de la N2 (e.g. 450ms après le stimulus pour la N450 ou « négativité frontale médiale » observée lors du Stroop (Checa et al., 2014). Ces composantes ERP manifestent une amplitude plus négative lors d'essai fortement conflictuel en comparaison à des essais peu ou non conflictuels. Cette négativité accrue est interprétée comme un marqueur de l'implication du contrôle cognitif dans la résolution de conflit (Checa et al., 2014). Des études développementales ont mis en évidence que la latence et l'amplitude de la N2 lié au conflit diminuait avec l'âge (Jonkman et al., 2007; Rueda, Posner, et al., 2004). Espinet et collaborateurs (Espinete et al., 2012) ont également étudié le développement du contrôle cognitif au travers de la N2 mesurée en situation de conflit (tâche DCCS). Ils observent que la N2, plus négative chez les participants manifestant le plus de persévération à la tâche, peut être appréhendée comme un marqueur de l'efficacité du contrôle cognitif. Ils ont par la suite utilisé ce marqueur lors d'un protocole d'entraînement de la réflexion lors de la réalisation de la même tâche DCCS. Ils ont constaté qu'après entraînement le groupe entraîné avait de meilleures performances à la tâche et

que ces bénéfiques comportementaux allaient de pair avec une réduction de l'amplitude de la N2.

L'étude de la cohérence effective, ainsi que l'analyse des ERPs reflétant l'implémentation du contrôle cognitif, sont donc des pistes à explorer pour compléter notre approche et tenter d'appréhender les effets de l'entraînement sur les réseaux cérébraux impliqués dans ce contrôle cognitif.

Cependant, il est également envisageable que les expériences d'interaction, de négociation, de partage ou de coopération engendrées par le contexte social de l'entraînement aient permis d'améliorer l'efficacité du contrôle dans le domaine émotionnel sans pour autant engendrer de gain d'efficacité du contrôle dans le domaine cognitif. Goldstein & Lerner (2018) ont constaté que trois sessions hebdomadaires de jeu de faire semblant réalisées sur deux mois en petits groupes d'enfant de 4 ans à 5 ans $\frac{1}{2}$ permettait une amélioration du contrôle émotionnel (Goldstein & Lerner, 2018). Au sein de notre protocole les mesures renseignant sur le contrôle émotionnel ont été obtenues au moyen de questionnaires remplis par les parents (PSA ou sous-échelle de contrôle émotionnel de la BRIEF) et n'ont mis en évidence aucun changement entre avant et après l'intervention. Goldstein & Lerner (2018), ont quant à eux utilisé des mesures d'observation évaluant la détresse personnelle versus le comportement de réconfort envers l'autre lorsqu'un expérimentateur feignait une sensation de douleur. Ils montrent qu'à la suite de l'entraînement les enfants manifestent un meilleur ajustement comportemental. Or, cet ajustement comportemental, reflet d'un meilleur contrôle émotionnel peut-être examiné au moyen de paradigme d'induction émotionnelle. C'est ce que Lewis et collaborateurs ont réalisé lors d'une étude développementale étudiant l'efficacité du contrôle inhibiteur dans un contexte émotionnel (Lewis et al., 2006). Les auteurs se sont intéressés particulièrement aux ERPs N2 et P3 en région frontale (modulation d'amplitude positive survenant environ 300ms après induction) enregistrés lors d'un Go-NoGo avec induction émotionnelle de frustration. Ils reportent qu'entre 5 et 16 ans l'amplitude et le délai des ERPs diminuent de manière quasi-linéaire reflétant une meilleure efficacité corticale avec le développement. Ils soulignent également que les ERPs, dont la localisation est estimée au CCA dorsal, sont modulés par l'induction émotionnelle. L'analyse de la composante P3 s'avère particulièrement

intéressante avec une amplitude plus importante pour les essais NoGo que pour les essais Go, une réduction de l'amplitude des essais NoGo (mais pas des essais Go) avec l'âge et une amplitude également amplifiée par le contexte de frustration indiquant des efforts accrus de contrôle inhibiteur lors de l'induction émotionnelle. Ainsi les ERPs seraient donc marqueurs à la fois du développement et de l'efficacité du contrôle émotionnel.

Ainsi les entraînements écologiques semblent particulièrement capables de bénéficier au contrôle cognitif lorsque ce dernier est mobilisé au service des compétences d'autorégulation notamment au travers de l'adaptation sociale, émotionnelle et comportementale, compétences médiatrices de réussite scolaire (Liew, 2012). Dans cette éventualité, on pourrait envisager que les outils de mesure utilisés au cours de cette thèse n'étaient pas optimaux ou pas adaptés pour évaluer l'impact de l'entraînement écologique mis en place. Une évaluation d'entraînement écologique se déroulant en contexte social plus adéquate pourrait alors proposer un protocole d'évaluation incluant une induction émotionnelle semblable à celle de Lewis et collaborateurs (Lewis et al., 2006) avec plusieurs modalités d'émotions (neutre versus excitation versus frustration). Un protocole qui semblerait pertinent afin de mettre en évidence des effets neuronaux relatifs à la gestion émotionnelle.

- › Une deuxième question que nous aborderons quant à l'absence d'effet de l'entraînement concerne l'activité contrôle. L'activité contrôle n'aurait-elle pas pu générer de bénéfices au même titre que l'activité d'entraînement ?

Les activités créatives proposées au groupe contrôle ont été choisies d'après leur recouvrement avec les activités réalisées quotidiennement dans les classes de maternelles (e.g. dessin, modelage, découpage, ...), donc des activités non-nouvelles. L'objectif était de proposer des activités « neutres » sollicitant le moins possible le contrôle cognitif et garantissant un format d'intervention identique à celui proposé au groupe expérimental. Cependant, dans les écoles, les activités créatives interviennent en tant qu'activités supports des apprentissages. Elles sont mises en place dans le but de mobiliser

et renforcer des compétences encore en développement. En effet lors d'activités créatives les enfants sont amenés à se définir un objectif, planifier les étapes nécessaires à son accomplissement, les mettre en œuvre et pour finir évaluer leur réalisation. Ces activités mobilisent donc fortement les compétences de contrôle, d'autorégulation et de métacognition (Metsärinne et al., 2014). Le contexte groupal dans lequel se déroulent ces activités est aussi un facteur pouvant accroître la mobilisation de certaines composantes de l'autorégulation. Les interactions sociales mobilisent des processus top-down de synchronisation et d'attention (Blume et al., 2015; Deiber et al., 2009; Missonnier et al., 2006; Sauseng et al., 2007) ainsi que de mémoire de travail (Blume et al., 2015; Missonnier et al., 2006) impliquant l'activité neuro-oscillatoire thêta. Il a également été suggéré que l'observation d'interactions sociales pouvait favoriser l'intégration complexe de processus comme le maintien actif d'objectif ou la théorie de l'esprit (Klein et al., 2009) et affecter ainsi le développement des composantes du contrôle cognitif précédemment citées.

A posteriori, nous pouvons donc remettre en question la neutralité de l'activité contrôle et la pertinence de sa mise en place au sein de notre groupe témoin, qui dans une certaine mesure aurait pu bénéficier de l'intervention. Ainsi, en l'absence d'un « réel » groupe contrôle, passif et/ou actif proposant une tâche non stimulante, l'amélioration des performances constatée entre les deux évaluations (pré et post) ne peut être directement imputée à l'intervention délivrée au sein du protocole. Notre plan expérimental ne nous permet donc pas de conclure sur l'efficacité de l'une ou de l'autre des modalités d'intervention proposées (jeu de faire semblant en groupe dirigé par un adulte versus activité créatives en groupe dirigées par un adulte). En revanche, notre plan nous permet de comparer entre elles les deux modalités d'entraînement. D'après cette hypothèse, on pourrait donc conclure que, dans les conditions proposées de dosage et de contenu, le jeu de faire semblant ne génère pas plus de bénéfices qu'une autre activité sollicitant également autorégulation et compétences socio-émotionnelles.

Au regard du modèle de Jolles & Crone (2012) (illustré en figure 8, p.65), la conjugaison des mesures de performances à la tâche expérimentale (reflétant

l'efficacité du fonctionnement du contrôle cognitif) aux mesures neuronales enregistrées lors de la même tâche (renseignant sur la maturité des mécanismes cérébraux impliqués dans la mise en œuvre du contrôle cognitif) nous permet d'identifier une trajectoire développementale reflétant l'amélioration survenant sous l'influence de l'entraînement (Jolles & Crone, 2012). À la lumière des résultats de l'étude transversale, nous pouvons observer qu'en posttest les enfants entraînés manifestent i) une amélioration de la gestion d'interférence et ii) une homogénéisation de l'intensité de l'amplitude de la MFT quel que soit la condition d'interférence. Ces deux indicateurs tendent à préciser un effet de l'entraînement qui s'inscrit sur les deux axes mentionnés dans le modèle de Jolles & Crone (2012). Cependant, sans différence entre notre groupe expérimental et notre groupe contrôle, et en l'absence d'indicateurs plus fins (qui auraient pu être apportés par l'intégration d'un groupe contrôle passif), nous ne sommes pas en mesure de différencier l'influence de nos deux modalités d'intervention (activité contrôle et expérimentale) sur la trajectoire développementale du contrôle cognitif. Cette étude a donc permis de constater des effets entre le pré et le posttest. Des effets qu'il nous est impossible de pouvoir attribuer au développement, à l'entraînement ou à l'interaction des deux au vu de l'absence de résultats entre nos groupes. On constate une réduction de l'amplitude moyenne de la MFT en posttest par rapport en prétest. Ce résultat est non spécifique au groupe entraîné et concerne l'ensemble des conditions de manière indifférenciée. Deux phénomènes peuvent être à l'origine de ce résultat. Le premier est une réduction de l'amplitude consécutive à la maturation. En effet, les études développementales nous montrent qu'avec la maturation, l'amplitude thêta tend à diminuer (Gibbs & Knott, 1949; Matoušek & Petersén, 1973; Saby & Marshall, 2012). Cependant, cette interprétation est remise en question par le fait que l'étude transversale n'a pas mis en évidence de diminution de l'amplitude chez les enfants plus âgés et que l'amplitude moyenne de la MFT lors de la tâche n'était pas différente entre les enfants de maternelle ou de primaire. Cela nous amène à un deuxième phénomène pouvant expliquer les résultats : l'effet re-test. Pour Shackman et collaborateurs (Shackman et al., 2011) la réduction d'activité neuronale lors d'un re-test peut être consécutive à une réduction de l'anxiété générée par le dispositif et le cadre d'évaluation. En effet, les enfants

ayant déjà été soumis à la tâche et au protocole connaissent ses enjeux et son déroulé. Or, l'activité oscillatoire thêta est également modulée par des processus neurophysiologiques consécutifs à l'anxiété (Cavanagh & Shackman, 2015). La réduction de l'amplitude de la MFT pourrait donc refléter cette diminution de l'anxiété vis-à-vis de la passation de la tâche en re-test par rapport à la première évaluation. D'autres auteurs interprètent cela comme pouvant résulter d'un effet d'apprentissage de la tâche. Cela a été montré au travers de réduction en re-test versus test au travers des ERPs (Fernández et al., 2009; Ip et al., 2018) ou du signal BOLD en IRMf (Chein & Schneider, 2005; Herting et al., 2018) dans le cadre de tâches exécutives. En parallèle de cette réduction d'activité, la tâche a été rapportée comme étant plus facile en re-test, ainsi qu'associée à de meilleures performances comportementales (Plichta et al., 2012). Par ailleurs, on constate une absence de différence dans l'amplitude thêta constatée entre les différentes conditions d'interférence lors du posttest, la condition d'interférence nulle n'étant pas significativement associée à une amplitude de MFT moindre.

Dans notre étude transversale, ce pattern de résultat, précédemment retrouvé chez les enfants d'âge scolaire, a été associée à une mobilisation du contrôle plus adaptée, prenant en compte le contexte d'incertitude par rapport à un conflit à venir. Il se pourrait donc que cette première expérience quelques mois auparavant, ait généré une modification de la façon dont les enfants d'âge scolaire mobilisent leur contrôle au cours de la tâche en re-test. À noter que les enfants se rappelaient tous très bien de la tâche et de ses règles. Une hypothèse qui tendrait à rejoindre un mécanisme croissant d'adaptation au conflit reflétant la prise de conscience de l'incertitude générée par la tâche ainsi que l'anticipation d'une éventuelle interférence dans l'essai à venir. Ce mécanisme serait cependant moins efficace chez les enfants d'âge préscolaire puisque sa mise en place n'est constatée que lors de la seconde présentation de la tâche, alors que chez les enfants plus matures elle s'observe dès la première passation.

Pour les jeunes enfants, peu d'études se sont intéressées au développement des processus de supervision du conflit et encore moins à leurs corrélats neuronaux. Il a été proposé que ce mécanisme résulte d'une réflexion

consciente de plus en plus développée sur son propre fonctionnement cognitif, ce qui permet de mettre en œuvre un niveau de contrôle correspondant à la demande impliquée par la tâche (Zelazo, 2004). Le rôle des compétences métacognitives dans la réalisation du besoin de contrôle et donc la mise en œuvre du mécanisme de supervision de conflit ne peut être directement observé au travers de nos mesures comportementales. Cependant, comme le montre Chevalier et collaborateurs (2015), les compétences métacognitives comme l'identification et le maintien actif du but (Chevalier & Blaye, 2009), ainsi que la détection d'erreur jouent un rôle important dans la dynamique d'implémentation du conflit (réactif versus proactif) (Chevalier et al., 2015; Chevalier & Blaye, 2016). Or, ces mécanismes sont communs à l'implémentation du contrôle cognitif. Des travaux réalisés chez l'adulte ont déjà mis en évidence que les performances métacognitives (jugements sur ses propres décisions) sont associées spécifiquement à l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire préfrontale dans la bande de fréquence thêta (Wokke et al., 2017). Les auteurs suggèrent qu'un contexte où l'erreur est prévisible est susceptible de favoriser la mise en place d'un mécanisme adaptatif visant à ajuster son comportement face à la tâche. Ce mécanisme reposerait sur l'activité neuro-oscillatoire préfrontale thêta, un rythme qui supporte la mise en œuvre du contrôle cognitif, la surveillance de l'action et le comportement flexible (Cavanagh & Frank, 2014; Cohen, 2014). Il est donc possible que la mesure de la MFT traduise également l'amélioration de la mise en œuvre des processus métacognitif. Dans une autre étude, Friedman et collaborateurs (2009) constatent que bien que les performances d'enfants de 9/10 ans soient inférieures à celles de jeunes adultes les enfants sont tout de même capables d'accroître leur niveau de contrôle cognitif (ERP plus négative en zone fronto-médiale liée à un conflit sur l'essai précédent) et d'augmenter leur capacité à détecter le conflit (ERP plus négative en zone fronto-médiale lié à un conflit sur l'essai courant) lorsqu'une seule source de conflit est présente (essai post-erreur, interférence Stimulus-Réponse) (Friedman et al., 2009). Ces résultats appuient notre hypothèse selon laquelle la MFT pourrait refléter la manière dont les enfants engagent leur contrôle dans la tâche.

D. LIMITES ET RECOMMANDATIONS

Comme dans toutes études, a fortiori lorsqu'un paradigme expérimental est mis en place pour la première fois, certaines limites peuvent être soulevées.

Dans le cadre de notre protocole microgénétique, nous avons intégré un groupe contrôle actif, c'est-à-dire un groupe soumis à une activité dans un contexte similaire. Afin de compléter ce protocole il aurait été enrichissant d'inclure un groupe contrôle passif, c'est-à-dire un groupe d'enfant pour lesquels seuls les évaluations pré et post-intervention auraient été réalisées. Cela aurait permis de distinguer les effets consécutifs à la mise en place d'une intervention (quelle qu'elle soit) des effets mixtes de test-retest et développement et de vérifier nos hypothèses sur d'éventuels bénéfices de l'activité contrôle. Une autre solution aurait été d'utiliser non pas un design pré-post classique mais un design de Solomon (Braver & Braver, 1988). Ce design se caractérise par la mise en place de quatre groupes indépendants et comparables. Parmi eux, deux groupes réalisent l'intervention, les deux sont évalués en post mais un seul est évalué en prétest, et la même procédure est appliquée aux groupes contrôle. Ce design permet de prendre en compte les effets développementaux et ainsi pouvoir distinguer cet effet mixte test-retest-développement. Bien sûr la mise en place d'un design comme celui-ci implique un échantillon et une logistique plus important(e).

Crone et collaborateurs (2006) rapportent dans la tâche Dots (similaire à cœur-flueur) des effets quant au changement de localisation de la réponse en interaction avec le changement de localisation du stimulus (Crone, Bunge, et al., 2006). Ainsi, un essai compatible suivant un autre essai compatible (i.e. essai cC) peut être concerné, ou non, par un changement de latéralité (i.e. premier essai cœur présenté à gauche, second essai cœur présenté à droite). Ces auteurs révèlent par exemple que le fait de changer de règle tout en maintenant une réponse similaire (i.e. presser la touche de droite) génère en soit une interférence supplémentaire. Cependant, ce niveau d'interférence, premièrement pris en compte dans nos plans d'analyses, n'a pas été introduit dans la suite de nos investigations à cause d'un manque d'essai au sein des 8

conditions créées. Cet effet est principalement remarqué lorsque les compétences de maintien actif sont développées et ne devrait donc pas avoir d'influence majeure sur les performances des enfants de maternelle. Dans une future investigation, sans la contrainte EEG, ou avec des enfants possédant de plus grandes capacités d'attention il serait possible d'étudier ce facteur et de contrôler son influence sur les performances associées à chacune des conditions d'interférence.

Dans cette même optique de contrôle des paramètres expérimentaux et de compréhension fine des mécanismes sous-jacents au traitement dans la tâche cœur-fleur, on pourrait également envisager la prise en compte de séquences plus grandes (i.e. ccC, soit un essai courant compatible précédé de deux autres essais compatibles). En effet, il a été reporté dans des tâches de reconfiguration que, chez des sujets plus âgés, des effets séquentiels pouvaient être générés depuis les deux essais précédents (Arbuthnott, 2005; Mayr & Keele, 2000; Schuch & Koch, 2003). Ces auteurs reportent un coup lié à l'inhibition de l'essai N-2 par rapport à l'essai actuel sur le TR. Cet effet de ralentissement pour les essais courants intervient du fait qu'il soit nécessaire de réactiver un task-set qui a été récemment inhibé (i.e. les essais ciC seraient associés à des TR plus longs que les essais iiC).

Le choix d'une approche écologique dans le cadre d'un entraînement ciblant le contrôle cognitif est peut-être à remettre en question. En effet, les interventions similaires à notre protocole d'intervention ayant montré des bénéfices font appel à la mise en place de comportements autorégulés. Or l'autorégulation demande à l'enfant de prendre en compte ses états internes et l'objectif qui lui est donné afin d'ajuster son attention, ses émotions, son comportement. En enseignant à l'enfant comment parvenir à cette autorégulation, il sera donc à-même de solliciter davantage de contrôle de manière autonome. En automatisant peu à peu ces compétences d'autorégulation, l'enfant pourra alors continuer de renforcer ses compétences seuls dans son quotidien en dehors de l'intervention. De plus, la réalisation de ces ateliers d'apprentissage en groupe sollicite également de mettre en place de l'autorégulation au travers des mécanismes dont nous avons précédemment parlé (i.e. inhibition de distraction,

attention ciblée, maintien actif). Ces apprentissages nécessitent de s'intéresser davantage aux compétences socio-émotionnelles (Liu, 2019) tout en maintenant un cadre faisant intervenir une ritualisation, ces deux aspects reposant sur l'implémentation du contrôle de même que sur les compétences d'autorégulation. Devant les résultats obtenus avec les approches stratégiques (Espinet et al., 2013; Lanoë et al., 2015; Neville et al., 2013; Rossi et al., 2015), et devant les considérations relevées au travers de cette discussion nous pensons que ce contexte d'intervention stratégique se pose comme un format idéal pour de futures interventions.

Avec davantage de perspective sur l'ensemble de ces travaux de thèse un certain nombre de recommandations méthodologiques peuvent être mentionnés dans le cadre d'étude s'intéressant au contrôle cognitif dans une fenêtre où ces capacités se développent rapidement. Pour ce qui est de l'évaluation il serait pertinent de recueillir plusieurs mesures du contrôle cognitif et de prévoir une évaluation supplémentaire afin d'appréhender d'éventuel effets sur le moyen terme et/ou le maintien de bénéfice après la fin de l'entraînement. Pour ce qui est de l'entraînement, il conviendrait d'augmenter le dosage pour un entraînement écologique. Dans une perspective développementale, la double approche transversale/longitudinale semble également pertinente dans le contexte d'un design expérimental contrôlé permettant d'isoler la nature des effets constatés (i.e. plan d'expérimentation complexe (e.g. Solomon), ajout d'un groupe contrôle actif et passif, obtention des données sociodémographiques ou d'information générale (influences environnementales) pour l'ensemble des participants).

V. Conclusion

Nous avons montré que l'activité neuro-oscillatoire thêta est impliquée dans la gestion de différentes interférences et à différents âges du développement chez l'enfant. Cela soutient l'hypothèse selon laquelle le rythme thêta jouerait un rôle de mécanisme neuronal général permettant la coordination des traitements cognitifs impliqués dans le contrôle cognitif et cela dès la petite enfance. De plus, nos données suggèrent que l'amplitude de l'activité neuro-oscillatoire thêta pourrait être un indicateur, à la fois de la complexité représentée par une situation de conflit mais aussi qu'elle pourrait refléter l'efficacité du contrôle cognitif. Ces travaux soulignent l'intérêt d'étudier l'activité neuro-oscillatoire thêta pour appréhender le développement des processus de traitement sous-jacents au contrôle cognitif. Sur le plan méthodologique, ces résultats mettent en évidence l'intérêt de proposer une tâche d'interférence faisant intervenir une gamme variée de processus de traitement (i.e. maintien actif, inhibition de réponse, changement de task-set) afin d'appréhender les capacités de contrôle au cours de l'enfance. Par ailleurs, ils nous confortent sur la plus-value des mesures EEG dans l'analyse de l'implémentation du contrôle cognitif. Enfin, nous avons montré qu'un entraînement écologique basé sur le jeu de faire semblant ne permet pas d'améliorer davantage l'efficacité du contrôle cognitif, qu'une intervention stimulant l'autorégulation dans un contexte similaire sans recours au jeu de faire semblant.

Les résultats et recherches menées au cours de ce travail de thèse ont un potentiel d'utilisation au niveau des écoles maternelles et de tout centre ou institution impliqué.e dans le quotidien des jeunes enfants. La rédaction d'une trame de bonnes pratiques et de recommandations documentées sur la mise en place de dispositifs d'étayage des compétences d'autorégulation et de contrôle cognitif pourrait être à envisager.

VI. Perspectives

Les perspectives de ce travail consistent dans un premier temps à explorer davantage les données recueillies au cours de cette thèse, en appliquant d'autres techniques d'analyses dans l'objectif de compléter nos résultats et de mieux appréhender la relation entre les performances comportementales et les données électroencéphalographiques. Par ailleurs, depuis octobre 2019, je suis impliqué dans un projet visant à implémenter et évaluer un programme d'intervention auprès des éducateurs (parents et personnels éducateurs) d'enfants "à risque" ou issues de milieux défavorisés. Il s'agit du programme « *Incredible Years* » (« Ces années incroyables » dans sa traduction francophone). Un programme développé au cours des années 1980 aux Etats-Unis par Carolyn Webster-Stratton, qui aujourd'hui se décompose sous formes de différents modules complémentaires, permettant une intervention auprès d'enfants de 3 à 16 ans (Webster-Stratton, 1998). Ce programme a été implémenté et évalué à de nombreuses reprises montrant des bénéfices auprès de plusieurs publics : enfants TDAH (Anastopoulos et al., 1993; Sonuga-Barke et al., 2001), enfants ayant subi des carences affectives (Corcoran, 2000; Herbert, 2000) ou enfants déterminés comme à risques (J. Heckman et al., 2013; Normandeau & Venet, 2000; Sonuga-Barke et al., 2002; Woolgar & Scott, 2005).

L'intervention prend la forme de séries de rencontres au cours desquelles des animateurs formés rencontrent un groupe de parents, introduisent des thématiques de réflexion touchant à la pédagogie (i.e. le jeu, les récompenses, les conséquences logiques). Les animateurs mettent en place un cadre participatif propice à la discussion et délivrent aux participants des connaissances et des outils visant à soutenir le développement de l'autorégulation au travers des compétences socio-émotionnelles, académiques et cognitives des enfants. Ces sessions visent à transmettre des concepts clés d'éducation, à redonner confiance aux parents en leurs aptitudes parentales, à valoriser la mise en place d'une relation parent-enfant et permettre

l'interaction entre parents. Les études montrent que les interventions impliquant la famille et ciblant les habiletés parentales ou la relation au sein de la fratrie permettent d'améliorer l'autorégulation des enfants (Liu, 2019; Pandey et al., 2018). De plus, les programmes d'entraînement aux habiletés parentales ont un fort potentiel d'impact sur les problèmes comportementaux (Hartman et al., 2003; J. Heckman et al., 2013; Nock & Kazdin, 2001). Cela passe au travers de l'intégration de principes pédagogiques tels que le renforcement positif, spécifique et conséquent, l'entraînement des compétences socio-émotionnelles au quotidien, la sollicitation des aptitudes de contrôle et de résolution de problème au cours d'activités diverses comme le jeu mais aussi l'utilisation optimisée de l'ignorance et des punitions (Letarte et al., 2010).

Comme les FEs, les compétences socio-émotionnelles permettent de prédire la santé, la réussite académique, sociale et économique (Duncan et al., 2007; Heckman et al., 2010; Sewell et al., 1969) et sont également prédites par le SES (Liu, 2019). Il a été mis en évidence que les compétences socio-émotionnelles pouvaient atténuer les effets du SES et permettre d'améliorer la réussite scolaire (Liu, 2019).. Ces auteurs précisent que le pouvoir modérateur de ces compétences sur le SES est accru au cours de deux périodes : la petite enfance et le début de l'adolescence. Une autre stratégie d'intervention afin de lutter contre l'échec scolaire au sein des populations les plus sensibles (i.e. population défavorisée) consisterait donc à agir sur ces compétences socio-émotionnelles dès le plus jeune âge.

Au cours de ce projet, nous aspirons à appliquer un programme ciblant les aptitudes d'autorégulation des jeunes enfants, en mesurant également son impact sur des aspects exécutifs et socio-émotionnels. Jusqu'alors, ce programme a reçu l'attention de nombreux chercheurs et des bénéfices ont été démontrés sur les parents (réduction du stress parental, du sentiment de dépression, amélioration du sentiment d'auto-efficacité), des enfants (réduction des comportements inappropriés au profit de comportement appropriés) et de la relation parents-enfant (amélioration des pratiques éducatives, de la relation affective). Cependant ces études se limitent à des évaluations reposant sur des questionnaires et observations sur des sphères spécifiques (interactions

sociales et émotion). En effet, à ce jour, le programme *Incredible Years*, déjà bien instauré et développé à l'échelle internationale, ne bénéficie pas d'une évaluation très étendue au niveau cognitif. L'intérêt est à présent d'évaluer pour la première fois son efficacité dans le contexte culturel français et d'enrichir son évaluation avec des mesures de l'autorégulation, des compétences socio-émotionnelles, du contrôle cognitif ainsi que de mesures cérébrales.

VII. Références

- Adam, N., Blaye, A., Gulbinaite, R., Delorme, A., & Farrer, C. (2020). The role of midfrontal theta oscillations across the development of cognitive control in preschoolers and school-age children. *Developmental Science*, 2, desc.12936. <https://doi.org/10.1111/desc.12936>
- Albertson, K., & Shore, C. (2008). Holding in mind conflicting information: Pretending, working memory, and executive control. *Journal of Cognition and Development*, 9(4), 390–410. <https://doi.org/10.1080/15248370802678240>
- Alloway, T. P., Bibile, V., & Lau, G. (2013). Computerized working memory training: Can it lead to gains in cognitive skills in students? *Computers in Human Behavior*, 29(3), 632–638. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.10.023>
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Kirkwood, H., & Elliott, J. (2009). The working memory rating scale: A classroom-based behavioral assessment of working memory. *Learning and Individual Differences*, 19(2), 242–245. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.10.003>
- Anastopoulos, A. D., Shelton, T. L., DuPaul, G. J., & Guevremont, D. C. (1993). Parent training for attention-deficit hyperactivity disorder: Its impact on parent functioning. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 21(5), 581–596.
- Andersen, S. L. (2003). Trajectories of brain development: Point of vulnerability or window of opportunity? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 27(1–2), 3–18. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(03\)00005-8](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(03)00005-8)
- Anderson, S., White-Schwoch, T., Parbery-Clark, A., & Kraus, N. (2013). Reversal of age-related neural timing delays with training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(11), 4357–4362. <https://doi.org/10.1073/pnas.1213555110>
- Arbuthnott, K. D. (2005). The influence of cue type on backward inhibition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31(5), 1030.
- Astle, D. E., Barnes, J. J., Baker, K., Colclough, G. L., & Woolrich, M. W. (2015). Cognitive Training Enhances Intrinsic Brain Connectivity in Childhood. *Journal of Neuroscience*, 35(16), 6277–6283. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4517-14.2015>
- Bachevalier, J., & Loveland, K. A. (2006). The orbitofrontal-amygdala circuit and self-regulation of social-emotional behavior in autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30(1), 97–117. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2005.07.002>
- Bachorowski, J.-A., & Newman, J. P. (1990). Impulsive motor behavior: Effects of personality and goal salience. In *Journal of Personality and Social Psychology* (Vol. 58, Issue 3, pp. 512–518). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.58.3.512>
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1–29.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1994). Developments in the concept of working memory.

- Neuropsychology*, 8(4), 485–493. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.8.4.485>
- Bailey, D., Duncan, G. J., Odgers, C., & Yu, W. (2015). *Persistence and Fadeout in the Impacts of Child and Adolescent Interventions*.
- Bailey, R., & Jones, S. M. (2013). *SECURE: An applied developmental model for social-emotional and selfregulation-related skills from birth to 3rd grade*.
- Bailey, R., & Jones, S. M. (2019). An Integrated Model of Regulation for Applied Settings. *Clinical Child and Family Psychology Review*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s10567-019-00288-y>
- Barber, A. D., & Carter, C. S. (2005). Cognitive control involved in overcoming prepotent response tendencies and switching between tasks. *Cerebral Cortex*, 15(7), 899–912. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh189>
- Barnett, L. A. (1984). Research Note: Young Children'S Resolution of Distress Through Play. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 25(3), 477–483. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1984.tb00165.x>
- Barnett, W. S., Jung, K., Yarosz, D. J., Thomas, J., Hornbeck, A., Stechuk, R., & Burns, S. (2008). Educational effects of the Tools of the Mind curriculum: A randomized trial. *Early Childhood Research Quarterly*, 23(3), 299–313. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2008.03.001>
- Baron, A., Malmberg, L. E., Evangelou, M., Nesbitt, K., & Farran, D. (2019). The Play's the Thing: Associations between Make-Believe Play and Self-Regulation in the Tools of the Mind Early Childhood Curriculum. *Early Education and Development*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/10409289.2019.1613327>
- 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? In *Psychology and Aging* (Vol. 23, Issue 4, pp. 765–777). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/a0013494>
- Bell, M. A. (2002). Power changes in infant EEG frequency bands during a spatial working memory task. *Psychophysiology*, 39(4), 450–458. <https://doi.org/10.1017.s0048577201393174>
- Bell, M. A., & Cuevas, K. (2012). Using EEG to Study Cognitive Development: Issues and Practices. In *Journal of Cognition and Development* (Vol. 13, Issue 3, pp. 281–294). <https://doi.org/10.1080/15248372.2012.691143>
- Bell, M. A., & Fox, N. A. (1992). The Relations between Frontal Brain Electrical Activity and Cognitive Development during Infancy - Bell - 2008 - Child Development - Wiley Online Library. In *Child Development* (Vol. 43, pp. 1142–1163).
- Bell, M. A., & Fox, N. A. (1997). Individual Differences in Object Permanence Performance at 8 Months: Locomotor Experience and Brain Electrical Activity. *Developmental Psychobiology*, 31(4), 287–297. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2302\(199712\)31:4<287::AID-DEV6>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(199712)31:4<287::AID-DEV6>3.0.CO;2-N)
- Bell, M. A., & Wolfe, C. D. (2007). Changes in brain functioning from infancy to early childhood: evidence from EEG power and coherence working memory tasks. *Developmental Neuropsychology*, 31(1), 21–38. https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101_2
- Benavides-Nieto, A., Romero-López, M., Quesada-Conde, A. B., & Corredor, G. A. (2017). Basic Executive Functions in Early Childhood Education and their Relationship with Social Competence. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 237(June 2016), 471–478.

<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2017.02.092>

- Berk, L. E., & Meyers, A. B. (2013). The Role of Make-Believe Play in the Development of Executive Function. Status of Research and Future Directions. *American Journal of Play*, 6(1), 98–110.
- Bernier, A., Carlson, S. M., Deschênes, M., & Matte-Gagné, C. (2012). Social factors in the development of early executive functioning: A closer look at the caregiving environment. *Developmental Science*, 15(1), 12–24. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01093.x>
- Bernier, A., Carlson, S. M., & Whipple, N. (2010). *From External Regulation to Self-Regulation - Early Parenting Precursors of Young Children's Executive Functioning*. 81(1), 326–339.
- Best, J. R., Miller, P. H., & Naglieri, J. a. (2011). Relations between executive function and academic achievement from ages 5 to 17 in a large, representative national sample. *Learning and Individual Differences*, 21(4), 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2011.01.007>
- Blair, C. (2002). School readiness: Integrating cognition and emotion in a neurobiological conceptualization of children's functioning at school entry. In *American Psychologist* (Vol. 57, Issue 2, pp. 111–127). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.57.2.111>
- Blair, C., & Diamond, A. (2008). Biological processes in prevention and intervention: The promotion of self-regulation as a means of preventing school failure. *Development and Psychopathology*, 20(3), 899.
- Blair, C., McKinnon, R. D., & Daneri, M. P. (2018). Effect of the tools of the mind kindergarten program on children's social and emotional development. *Early Childhood Research Quarterly*, 43, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.01.002>
- Blair, C., & Raver, C. C. (2014). Closing the Achievement Gap through Modification of Neurocognitive and Neuroendocrine Function: Results from a Cluster Randomized Controlled Trial of an Innovative Approach to the Education of Children in Kindergarten. *PLoS ONE*, 9(11), e112393. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112393>
- Blair, C., Raver, C. C., & Berry, D. J. (2014). Two approaches to estimating the effect of parenting on the development of executive function in early childhood. *Developmental Psychology*, 50(2), 554–565. <https://doi.org/10.1037/a0033647>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>
- Blume, C., Lechinger, J., del Giudice, R., Wislowska, M., Heib, D. P. J., & Schabus, M. (2015). EEG oscillations reflect the complexity of social interactions in a non-verbal social cognition task using animated triangles. *Neuropsychologia*, 75, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.06.009>
- Bodrova, E., & Leong, D. J. (2006). *Tools of the mind*. Pearson Australia Pty Limited.
- Bodrova, E., & Leong, D. J. (2013). Play and Self-Regulation. *American Journal of Play*, 6(1), 111–123.
- Bos, K. J., Fox, N. A., Zeanah, C. H., & Nelson III, C. A. (2009). Effects of early psychosocial deprivation on the development of memory and executive function. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 3(September), 1–7. <https://doi.org/10.3389/neuro.08.016.2009>

- Bosseler, A. N., Taulu, S., Pihko, E., Mäkelä, J. P., Imada, T., Ahonen, A., & Kuhl, P. K. (2013). Theta brain rhythms index perceptual narrowing in infant speech perception. *Frontiers in Psychology*, 4(October), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00690>
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624–652. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.3.624>
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). *Conflict monitoring and anterior cingulate cortex : an update*. 8(12), 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.10.003>
- Botvinick, M., Nystrom, L. E., Fissell, K., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (1999). Conflict monitoring versus selection for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 402(6758), 179–181. <https://doi.org/10.1038/46035>
- Bouquet, C. A., Bonnin, C., & Gaonac'h, D. (2013). Approche intégrative du contrôle exécutif dans le paradigme de permutation de tâche. In *L'Année psychologique* (Vol. 113, Issue 01). <https://doi.org/10.4074/s0003503313001061>
- Bradley, R. H., Corwyn, R. F., McAdoo, H. P., & Garcia Coll, C. (2001). The Home Environments of Children in the United States Part I: Variations by Age, Ethnicity, and Poverty Status. *Child Development*, 72(6), 1844–1867. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.t01-1-00382>
- Braet, W., Johnson, K. A., Tobin, C. T., Acheson, R., Bellgrove, M. A., Robertson, I. H., & Garavan, H. (2009). Functional developmental changes underlying response inhibition and error-detection processes. *Neuropsychologia*, 47(14), 3143–3151. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.07.018>
- Braver, M. W., & Braver, S. L. (1988). Statistical treatment of the Solomon four-group design: A meta-analytic approach. *Psychological Bulletin*, 104(1), 150–154. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.104.1.150>
- Braver, T S, Reynolds, J. R., & Donaldson, D. I. (2003). Neural mechanisms of transient and sustained cognitive control during task switching. *Neuron*, 39(4), 713–726.
- Braver, T S, & Ruge, H. (2006). *Functional neuroimaging of cognition*.
- Braver, Todd S. (2012). The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(2), 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.010>
- Braver, Todd S, & West, R. (2008). Working memory, executive control, and aging. *The Handbook of Aging and Cognition*, 3, 311–372.
- 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(March), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00063>
- Brock, L. L., Rimm-Kaufman, S. E., Nathanson, L., & Grimm, K. J. (2009). The contributions of “hot” and “cool” executive function to children’s academic achievement, learning-related behaviors, and engagement in kindergarten. *Early Childhood Research Quarterly*, 24(3), 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2009.06.001>
- Brown, J. W., & Braver, T. S. (2005). Learned Predictions of Error Likelihood in the Anterior Cingulate Cortex. *Science*, 307(5712), 1118–1121. <https://doi.org/10.1126/science.1105783>

- Brown, T. T., & Jernigan, T. L. (2012). Brain development during the preschool years. In *Neuropsychology Review* (Vol. 22, Issue 4, pp. 313–333). <https://doi.org/10.1007/s11065-012-9214-1>
- Bruchmann, M., Herper, K., Konrad, C., Pantev, C., & Huster, R. J. (2010). Individualized EEG source reconstruction of Stroop interference with masked color words. *NeuroImage*, *49*(2), 1800–1809. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.09.032>
- Bryck, R. L., & Fisher, P. a. (2012). Training the brain: Practical applications of neural plasticity from the intersection of cognitive neuroscience, developmental psychology, and prevention science. *American Psychologist*, *67*(2), 87–100. <https://doi.org/10.1037/a0024657>
- 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. *Developmental Science*, *14*(4), 679–692. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01012.x>
- Bull, R., Espy, K. A., & Wiebe, S. a. (2008). Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers: Longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years. *Developmental Neuropsychology*, *33*(3), 205–228. <https://doi.org/10.1080/87565640801982312>
- Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive function as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, *19*(3), 273–293. <https://doi.org/10.1207/S15326942DN1903>
- Bunge, S. A., Dudukovic, N. M., Thomason, M. E., Vaidya, C. J., & Gabrieli, J. D. E. (2002). Immature frontal lobe contributions to cognitive control in children: Evidence from fMRI. *Neuron*, *33*(2), 301–311. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00583-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00583-9)
- Bunge, S. A., & Wright, S. B. (2007). Neurodevelopmental changes in working memory and cognitive control. *Current Opinion in Neurobiology*, *17*(2), 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.02.005>
- Burger, K. (2010). How does early childhood care and education affect cognitive development? An international review of the effects of early interventions for children from different social backgrounds. *Early Childhood Research Quarterly*, *25*(2), 140–165. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2009.11.001>
- Burgess, G. C., & Braver, T. S. (2010). Neural mechanisms of interference control in working memory: Effects of interference expectancy and fluid intelligence. *PLoS ONE*, *5*(9), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012861>
- Burle, B., Allain, S., Vidal, F., & Hasbroucq, T. (2005). Sequential Compatibility Effects and Cognitive Control: Does Conflict Really Matter? In *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* (Vol. 31, Issue 4, pp. 831–837). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.4.831>
- Burman, J. T., Green, C. D., & Shanker, S. (2015). On the Meanings of Self-Regulation: Digital Humanities in Service of Conceptual Clarity. *Child Development*, *86*(5), 1507–1521. <https://doi.org/10.1111/cdev.12395>
- Buschkuhl, M., Jaeggi, S. M., & Jonides, J. (2012). Neuronal effects following working memory training.

- Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(SUPPL. 1), S167–S179.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.10.001>
- Calkins, S. D., & Fox, N. A. (2002). Self-regulatory processes in early personality development: A multilevel approach to the study of childhood social withdrawal and aggression. *Development and Psychopathology*, 14(3), 477–498. <https://doi.org/10.1017/s095457940200305x>
- Cameron Ponitz, C. E., McClelland, M. M., Jewkes, A. M., Connor, C. M. D., Farris, C. L., & Morrison, F. J. (2008). Touch your toes! Developing a direct measure of behavioral regulation in early childhood. *Early Childhood Research Quarterly*, 23(2), 141–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2007.01.004>
- Cantin, R. H., Gnaedinger, E. K., Gallaway, K. C., Hesson-McInnis, M. S., & Hund, A. M. (2016). Executive functioning predicts reading, mathematics, and theory of mind during the elementary years. *Journal of Experimental Child Psychology*, 146, 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.01.014>
- Cao, J., Wang, S., Ren, Y., Zhang, Y., Cai, J., Tu, W., Shen, H., Dong, X., & Xia, Y. (2013). Interference control in 6-11 year-old children with and without ADHD: Behavioral and ERP study. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 31(5), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2013.04.005>
- Capage, L., & Watson, A. C. (2001). Individual Differences in Theory of Mind, Aggressive Behavior, and Social Skills In Young Children. *Early Education and Development*, 12(4), 613–628. https://doi.org/10.1207/s15566935eed1204_7
- Carlson, S. M. (2009). Social origins of executive function development. *New Directions for Child and Adolescent Development*, 2009(123), 87–98. <https://doi.org/10.1002/cd.237>
- Carlson, S. M., & Moses, L. J. (2001). Individual Differences in Inhibitory Control and Children's Theory of Mind. *Child Development*, 72(4), 1032–1053. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00333>
- Carlson, S. M., Moses, L. J., & Claxton, L. J. (2004). Individual differences in executive functioning and theory of mind: An investigation of inhibitory control and planning ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(4), 299–319. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.01.002>
- Carlson, S. M., White, R. E., & Davis-Unger, A. C. (2014). Evidence for a relation between executive function and pretense representation in preschool children. *Cognitive Development*, 29(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2013.09.001>
- Carter, C. S. (1998). Anterior Cingulate Cortex, Error Detection, and the Online Monitoring of Performance. *Science*, 280(5364), 747–749. <https://doi.org/10.1126/science.280.5364.747>
- Carter, C. S., & van Veen, V. (2007). Anterior cingulate cortex and conflict detection: An update of theory and data. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 367–379. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.367>
- Case, R. (1985). *Intellectual development: Birth to adulthood*. Academic Pr.
- Casey, B. J., Giedd, J. N., & Thomas, K. M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, 54(1–3), 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00058-2)
- Casey, B. J., Tottenham, N., Liston, C., & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: What have

- we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3 SPEC. ISS.), 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.011>
- Casey, B. J., Trainor, R. J., Orendi, J. L., Schubert, A. B., Nystrom, L. E., Cohen, J. D., & Noll, D. C. (1996). A pediatric functional MRI study of prefrontal activation during performance of a Go-No-Go task. *NeuroImage*, 3(3), S593. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(96\)80595-7](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(96)80595-7)
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(8), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Cavanagh, J. F., & Shackman, A. J. (2015). Frontal midline theta reflects anxiety and cognitive control: Meta-analytic evidence. *Journal of Physiology Paris*, 109(1–3), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2014.04.003>
- Cavanagh, J. F., Wiecki, T. V, Cohen, M. X., Figueroa, C. M., Samanta, J., Sherman, S. J., & Frank, M. J. (2011). Subthalamic nucleus stimulation reverses mediofrontal influence over decision threshold. *Nature Neuroscience*, 14, 1462. <https://doi.org/10.1038/nn.2925>
- Cavanagh, J. F., Zambrano-Vazquez, L., & Allen, J. J. B. (2012). Theta lingua franca: A common mid-frontal substrate for action monitoring processes. *Psychophysiology*, 49(2), 220–238. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01293.x>
- Cemore, J. J., & Herwig, J. E. (2005). Delay of gratification and make-believe play of preschoolers. *Journal of Research in Childhood Education*, 19(3), 251–266.
- 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. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.37.5.715>
- Chang, Y. K., Tsai, Y. J., Chen, T. T., & Hung, T. M. (2013). The impacts of coordinative exercise on executive function in kindergarten children: An ERP study. *Experimental Brain Research*, 225(2), 187–196. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3360-9>
- Checa, P., Castellanos, M. C., Abundis-Gutiérrez, A., & Rueda, M. R. (2014). Development of neural mechanisms of conflict and error processing during childhood: Implications for self-regulation. *Frontiers in Psychology*, 5(APR), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00326>
- Chen, J. M., & Schneider, W. (2005). Neuroimaging studies of practice-related change: fMRI and meta-analytic evidence of a domain-general control network for learning. *Cognitive Brain Research*, 25(3), 607–623. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.08.013>
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant: Concepts et développement. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 51(3), 149.
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2009). Setting goals to switch between tasks: Effect of cue transparency on children's cognitive flexibility. In *Developmental Psychology* (Vol. 45, Issue 3, pp. 782–797). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/a0015409>
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2016). Metacognitive Monitoring of Executive Control Engagement During Childhood. *Child Development*, 87(4), 1264–1276. <https://doi.org/10.1111/cdev.12537>
- Chevalier, N., Huber, K. L., Wiebe, S. A., & Espy, K. A. (2013). Qualitative change in executive control during childhood and adulthood. *Cognition*, 128(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.02.012>

- Chevalier, N., Martis, S. B., Curran, T., & Munakata, Y. (2015). Metacognitive Processes in Executive Control Development: The Case of Reactive and Proactive Control. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1–12. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00782
- Chew, A. L., & Morris, J. D. (1984). Validation of the Lollipop Test: A diagnostic screening test of school readiness. *Educational and Psychological Measurement*, 44(4), 987–991.
- Christiano, B. A., & Russ, S. W. (1996). Play as a predictor of coping and distress in children during invasive dental procedure. *Journal of Clinical Child Psychology*, 25(2), 130–138.
- Chung, K. K., & Silva, A. D. De. (2013). *Effects of a Pretend Play Intervention on Executive Functioning Tasks*.
- Clark, C. A. C., Chevalier, N., Nelson, J. M., James, T. D., Garza, J. P., Choi, H.-J., & Espy, K. A. (2016). I. Executive Control in Early Childhood. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 81(4), 7–29. <https://doi.org/10.1111/mono.12268>
- Clayson, P. E., & Larson, M. J. (2011). Conflict adaptation and sequential trial effects: Support for the conflict monitoring theory. *Neuropsychologia*, 49(7), 1953–1961. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.03.023>
- Cohen, J. D., Botvinick, M. M., & Carter, C. S. (2000). Anterior cingulate and prefrontal cortex: who's in control? *Nature Neuroscience*, 3(5), 421–423.
- Cohen, M. X. (2014). A neural microcircuit for cognitive conflict detection and signaling. *Trends in Neurosciences*, 37(9), 480–490. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.06.004>
- Cohen, M. X., & Cavanagh, J. F. (2011). Single-trial regression elucidates the role of prefrontal theta oscillations in response conflict. *Frontiers in Psychology*, 2(FEB). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00030>
- Cohen, M. X., & Donner, T. H. (2013). Midfrontal conflict-related theta-band power reflects neural oscillations that predict behavior. *Journal of Neurophysiology*, 110(12), 2752–2763. <https://doi.org/10.1152/jn.00479.2013>
- Cohen, M. X., & Ridderinkhof, K. R. (2013). EEG Source Reconstruction Reveals Frontal-Parietal Dynamics of Spatial Conflict Processing. *PLoS ONE*, 8(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057293>
- Cole, M. W., & Schneider, W. (2007). The cognitive control network: Integrated cortical regions with dissociable functions. *NeuroImage*, 37(1), 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.071>
- Colé, P., Duncan, L. G., & Blaye, A. (2014). Cognitive flexibility predicts early reading skills. *Frontiers in Psychology*, 5(June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00565>
- Colom, R., Román, F. J., Abad, F. J., Shih, P. C., Privado, J., Froufe, M., Escorial, S., Martínez, K., Burgaleta, M., Quiroga, M. A., & others. (2013). Adaptive n-back training does not improve fluid intelligence at the construct level: Gains on individual tests suggest that training may enhance visuospatial processing. *Intelligence*, 41(5), 712–727.
- Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (1994). Working memory and retrieval: A resource-dependent inhibition model. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123(4), 354.
- Cooper, D. H., & Farran, D. C. (1988). Behavioral risk factors in kindergarten. *Early Childhood Research*

Quarterly, 3(1), 1–19.

- Corcoran, J. (2000). Family interventions with child physical abuse and neglect: A critical review. *Children and Youth Services Review*, 22(7), 563–591.
- Courchesne, E., & Pierce, K. (2005). Why the frontal cortex in autism might be talking only to itself: Local over-connectivity but long-distance disconnection. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.001>
- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, S. J., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. A. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51(1), 42–100. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2004.12.001>
- Cragg, L., Keeble, S., Richardson, S., Roome, H. E., & Gilmore, C. (2017). Direct and indirect influences of executive functions on mathematics achievement. *Cognition*, 162, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.01.014>
- Crone, E. A., Bunge, S. A., Van Der Molen, M. W., & Richard Ridderinkhof, K. (2006). Switching between tasks and responses: A developmental study. *Developmental Science*, 9(3), 278–287. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00490.x>
- Crone, E. A., Donohue, S. E., Honomichl, R., Wendelken, C., & Bunge, S. A. (2006). Brain regions mediating flexible rule use during development. *Journal of Neuroscience*, 26(43), 11239–11247. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2165-06.2006>
- Cuevas, K., Bell, M. A., Marcovitch, S., & Calkins, S. D. (2012). Electroencephalogram and heart rate measures of working memory at 5 and 10 months of age. In *Developmental Psychology* (Vol. 48, Issue 4, pp. 907–917). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/a0026448>
- Cuevas, K., Hubble, M., & Bell, M. A. (2012). Early Childhood Predictors of Post-Kindergarten Executive Function: Behavior, Parent Report, and Psychophysiology. *Early Education and Development*, 23(1), 59–73. <https://doi.org/10.1080/10409289.2011.611441>
- Cuevas, K., Raj, V., & Bell, M. A. (2012). A frequency band analysis of two-year-olds' memory processes. *International Journal of Psychophysiology*, 83(3), 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.11.009>
- Cuevas, K., Swingler, M. M., Bell, M. A., Marcovitch, S., & Calkins, S. D. (2012). Measures of frontal functioning and the emergence of inhibitory control processes at 10 months of age. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(2), 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.01.002>
- Cunillera, T., Fuentemilla, L., Periañez, J., Marco-Pallarès, J., Krämer, U. M., Càmara, E., Münte, T. F., & Antoni, R. F. (2012). Brain oscillatory activity associated with task switching and feedback processing. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 12(1), 16–33. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0075-5>
- Currie, C., Hurrelmann, K., Settertobulte, W., Smith, R., & Todd, J. (2000). *Health and Health Behaviour Among Young People: Health Behaviour in School-aged Children: a Cross-national Study (HBSC) International Report*. WHO.
- Dahlin, E., Neely, A. S., Larsson, A., Backman, L., & Nyberg, L. (2008). Transfer of Learning After Updating Training Mediated by the Striatum. *Science*, 320(5882), 1510–1512. <https://doi.org/10.1126/science.1155466>

- Dansky, J. L. (1980). Cognitive Consequences of Sociodramatic Play and Exploration Training for Economically Disadvantaged Preschoolers. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 21(1), 47–58. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1980.tb00015.x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- Davis-unger, A. C., & Carlson, S. M. (2008). *Davis-Unger_et_al-2008-Mind,_Brain,_and_Education*. 2(3), 128–135.
- De Agostini, M., & Dellatolas, G. (1988). Une épreuve simple pour évaluer la préférence manuelle chez l'enfant à partir de 3 ans. *Enfance*, 41(3), 139–147. <https://doi.org/10.3406/enfan.1988.2161>
- De Franchis, V., Usai, M. C., Viterbori, P., & Traverso, L. (2017). *Preschool executive functioning and literacy achievement in Grades 1 and 3 of primary school: A longitudinal study*. 54, 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2017.01.026>
- de Jong, R. (1995). Strategical determinants of compatibility effects with task uncertainty. *Acta Psychologica*, 88(3), 187–207.
- De Pisapia, N., & Braver, T. S. (2006). A model of dual control mechanisms through anterior cingulate and prefrontal cortex interactions. *Neurocomputing*, 69(10–12), 1322–1326. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.100>
- Deiber, M. P., Ibañez, V., Missonnier, P., Herrmann, F., Fazio-Costa, L., Gold, G., & Giannakopoulos, P. (2009). Abnormal-induced theta activity supports early directed-attention network deficits in progressive MCI. *Neurobiology of Aging*, 30(9), 1444–1452. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2007.11.021>
- Deneault, J., Lefebvre, O., & Rousseau, C. (2014). Le jeu symbolique permet-il de se «préparer à l'école»? Les effets des ateliers d'expression Jeu dans le sable sur le développement d'enfants de 4 à 6 ans. TT - Can symbolic play improve school readiness? Impact of sandplay expression workshops on the de. *Revue de Psychoéducation*, 43(2), 299–321. https://www.lib.uwo.ca/cgi-bin/ezpauthn.cgi?url=http://search.proquest.com/docview/1650984071?accountid=15115%5Chttp://vr2pk9sx9w.search.serialssolutions.com/?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&rft_id=info:sid/ProQ%3Apsycinfo&rft_val_fmt=info
- DeSoto, M. C., Fabiani, M., Geary, D. C., & Gratton, G. (2001). When in doubt, do it both ways: Brain evidence of the simultaneous activation of conflicting motor responses in a spatial Stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(4), 523–536. <https://doi.org/10.1162/08989290152001934>
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions Shown to Aid Executive Function Development in Children 4 to 12 Years Old. *Science*, 333(6045), 959–964. <https://doi.org/10.1126/science.1204529>
- Diamond, Adele. (1990). Developmental time course in human infants and infant monkeys, and the neural bases of, inhibitory control in reaching. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 608(d), 637–669. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1990.tb48913.x>
- Diamond, Adele. (2002). A model system for studying the role of dopamine in prefrontal cortex during early development in humans. In *Brain development and cognition: A reader (2nd ed.)*. (Issue

- September). <https://doi.org/10.1002/9780470753507.ch22>
- Diamond, Adele. (2013). Executive Function. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385157-4.01147-7>
- Diamond, Adele, Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool program improves cognitive control. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5855), 1387–1388. <https://doi.org/10.1126/science.1151148>
- Diamond, Adele, & 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. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Dias, N. M., & Seabra, A. G. (2016). Intervention for executive functions development in early elementary school children: Effects on learning and behavior. *Educational Psychology*, 34(10)(August). <https://doi.org/10.1080/01443410.2016.1214686>
- Dias, Natália Martins, & Seabra, A. G. (2013). Programa de intervenção sobre a autorregulação e funções executivas--PIAFEx. *São Paulo: Memnon*.
- Diaz, A., & Bell, M. A. (2011). Information processing efficiency and regulation at five months. *Infant Behavior and Development*, 34(2), 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2010.12.011>
- Doesburg, S. M., Vidal, J., & Taylor, M. J. (2013). Reduced Theta Connectivity during Set-Shifting in Children with Autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(November), 785. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00785>
- 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. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2302\(200003\)36:2<161::AID-DEV7>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(200003)36:2<161::AID-DEV7>3.0.CO;2-0)
- Duckworth, Angela L. (2011). The significance of self-control. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(7), 2639–2640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019725108>
- Duckworth, Angela Lee, Stepaha, & Carlson, nie M. (2015). Self-regulation and school success. *Self-Regulation and Autonomy: Social and Developmental Dimensions of Human Conduct*, 208–230.
- Dumas, J. E., LaFrenière, P. J., Capuano, F., & Durning, P. (1997). *Profil Socio-Affectif (PSA): Évaluation des compétences sociales et des difficultés d'adaptation des enfants de 2 u ans à 6 ans*.
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., Pagani, L. S., Feinstein, L., Engel, M., Brooks-Gunn, J., & others. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, 43(6), 1428.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01633-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01633-7)
- Duncan, John, & Miller, E. K. (2002). Cognitive Focus through Adaptive Neural Coding in the Primate Prefrontal Cortex. In *Principles of Frontal Lobe Function* (pp. 278–291). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195134971.003.0018>
- Dunn, L. M., & Dunn, L. M. (1997). *PPVT-III: Peabody picture vocabulary test*. American Guidance

Service.

- Dunn, L. M., Dunn, L. M., & Thériault-Whalen, C. M. (1993). *Échelle de vocabulaire en images Peabody: EVIP*. Psycan.
- Durston, S., & Casey, B. J. (2006). What have we learned about cognitive development from neuroimaging? *Neuropsychologia*, 44(11), 2149–2157. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.10.010>
- Dweck, C. S., Chiu, C., & Hong, Y. (1995). Implicit Theories and Their Role in Judgments and Reactions: A Word From Two Perspectives. *Psychological Inquiry*, 6(4), 267–285. https://doi.org/10.1207/s15327965pli0604_1
- Egner, T. (2007). Congruency sequence effects and cognitive control. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 7(4), 380–390. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.380>
- Egner, T., Delano, M., & Hirsch, J. (2007). Separate conflict-specific cognitive control mechanisms in the human brain. *NeuroImage*, 35(2), 940–948. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.11.061>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.02.001>
- Eriksen, B., & Eriksen, C. W. (1974). *Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task* *. 16(1), 143–149.
- Espinet, S. D., Anderson, J. E., & Zelazo, P. D. (2012). N2 amplitude as a neural marker of executive function in young children: An ERP study of children who switch versus perseverate on the Dimensional Change Card Sort. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(SUPPL. 1), S49–S58. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.12.002>
- Espinet, S. D., Anderson, J. E., & Zelazo, P. D. (2013). Reflection training improves executive function in preschool-age children: Behavioral and neural effects. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 4, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.11.009>
- Fabiani, M., Friedman, D., & Cheng, J. C. (1998). Individual differences in P3 scalp distribution in older adults, and their relationship to frontal lobe function. *Psychophysiology*, 35(6), 698–708. <https://doi.org/10.1017/S0048577298970780>
- Fair, D. A., Cohen, A. L., Dosenbach, N. U. F., Church, J. A., Miezin, F. M., Barch, D. M., Raichle, M. E., Petersen, S. E., & Schlaggar, B. L. (2008). The maturing architecture of the brain's default network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(10), 4028–4032. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800376105>
- Fair, D. a, Dosenbach, N. U. F., Church, J. a, Cohen, A. L., Brahmhatt, S., Miezin, F. M., Barch, D. M., Raichle, M. E., Petersen, S. E., & Schlaggar, B. L. (2007). Development of distinct control networks through segregation and integration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(33), 13507–13512. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705843104>
- Farah, M. J. (2017). The Neuroscience of Socioeconomic Status: Correlates, Causes, and Consequences. *Neuron*, 96(1), 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.08.034>
- Fay-Stammach, T., Hawes, D. J., & Meredith, P. (2014). Parenting Influences on Executive Function in Early Childhood: A Review. *Child Development Perspectives*, 8(4), 258–264.

<https://doi.org/10.1111/cdep.12095>

- Fernandez-Duque, D., Baird, J. A., & Posner, M. I. (2000). Executive Attention and Metacognitive Regulation. *Consciousness and Cognition*, 9(2), 288–307. <https://doi.org/10.1006/ccog.2000.0447>
- Fernández, T., Harmony, T., Rodríguez, M., Reyes, A., Bernal, J., Fernández, T., Harmony, T., Rodríguez, M., Reyes, A., Reyes, A., Marosi, E., & Bernal, J. (2009). *Test-Retest Reliability of EEG Spectral Parameters During Cognitive Tasks : I Absolute and Relative Power TEST-RETEST RELIABILITY OF EEG SPECTRAL PARAMETERS DURING COGNITIVE TASKS : I ABSOLUTE AND RELATIVE POWER*. 7454, 255–261. <https://doi.org/10.3109/00207459308994280>
- Fisher, E. P. (1992). The impact of play on development: A meta-analysis. *Play & Culture*, 5(2), 159–181.
- Freeman, S. (2013). *Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence BT - Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (F. R. Volkmar (ed.); pp. 3351–3360). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1698-3_866
- Friedman, D., Nessler, D., Cycowicz, Y. M., & Horton, C. (2009). Development of and Change in Cognitive Control: A Comparison of Children, Young and Older Adults. *Cognitive Affective Behavioral Neuroscience*, 9(1), 91–102. <https://doi.org/10.3758/CABN.9.1.91>.Development
- Fries, P. (2005). A mechanism for cognitive dynamics: Neuronal communication through neuronal coherence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(10), 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.08.011>
- Frye, D. (1995). Theory of mind and rule-based reasoning. In *Cognitive development*. (Vol. 10, Issue 4, p. 483). [https://doi.org/10.1016/0885-2014\(95\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0885-2014(95)90024-1)
- Galyer, K. T., & Evans, I. M. (2001). Pretend play and the development of emotion regulation in preschool children. *Early Child Development and Care*, 166(1), 93–108. <https://doi.org/10.1080/0300443011660108>
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: a review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31–60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Gerst, E. H., Cirino, P. T., Fletcher, J. M., & Yoshida, H. (2015). Cognitive and behavioral rating measures of executive function as predictors of academic outcomes in children. *Child Neuropsychology*, 7049(December), 1–27. <https://doi.org/10.1080/09297049.2015.1120860>
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., Diamond, A., & others. (1994). The relationship between cognition and action: Performance of children 3 1/2-7 years old on a Stroop-like day-night test. *Cognition*, 53(2), 129–153.
- Gibbs, F. A., & Knott, J. R. (1949). Growth of the electrical activity of the cortex. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1(1–4), 223–229.
- Gilpin, A. T., Brown, M. M., & Pierucci, J. M. (2015). Relations between fantasy orientation and emotion regulation in preschool. *Early Education and Development*, 26(7), 920–932.
- Gioia, G. a, Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. (2010). *Child Neuropsychology : A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence TEST REVIEW Behavior Rating Inventory of Executive Function Behavior Rating Inventory of Executive Function*. April

- 2013, 37–41. <https://doi.org/10.1080/09297049.2010.535654>
- Gold, B. T., Kim, C., Johnson, N. F., Kryscio, R. J., & Smith, C. D. (2013). Lifelong Bilingualism Maintains Neural Efficiency for Cognitive Control in Aging. *Journal of Neuroscience*, *33*(2), 387–396. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3837-12.2013>
- Goldberg, E. (2002). *The executive brain: Frontal lobes and the civilized mind*. Oxford University Press, USA.
- Goldstein, T. R., & Lerner, M. D. (2018). Dramatic pretend play games uniquely improve emotional control in young children. *Developmental Science*, *21*(4), 1–13. <https://doi.org/10.1111/desc.12603>
- Goodman, R. (2001). Psychometric properties of the strengths and difficulties questionnaire. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, *40*(11), 1337–1345.
- Grant, D. A., & Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. In *Journal of Experimental Psychology* (Vol. 38, Issue 4, pp. 404–411). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/h0059831>
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1992). Optimizing the use of information: Strategic control of activation of responses. In *Journal of Experimental Psychology: General* (Vol. 121, Issue 4, pp. 480–506). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.121.4.480>
- Gulbinaite, R., van Rijn, H., & Cohen, M. X. (2014). Fronto-parietal network oscillations reveal relationship between working memory capacity and cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00761>
- Gulbinaite, R., van Viegen, T., Wieling, M., Cohen, M. X., & VanRullen, R. (2017). Individual Alpha Peak Frequency Predicts 10 Hz Flicker Effects on Selective Attention. *The Journal of Neuroscience*, *37*(42), 10173–10184. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1163-17.2017>
- Hackman, D. A., Farah, M. J., & Meaney, M. J. (2010). *Socioeconomic status and the brain : mechanistic insights from human and animal research*. *434*(1957). <http://dx.doi.org/10.1038/nrn2897>
- Halle, T. G., & Darling-Churchill, K. E. (2016). Review of measures of social and emotional development. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *45*, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2016.02.003>
- Hanslmayr, S., Pastötter, B., Bäuml, K. H., Gruber, S., Wimber, M., & Klimesch, W. (2008). The electrophysiological dynamics of interference during the stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(2), 215–225. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20020>
- Harris, P. L., Kavanaugh, R. D., Wellman, H. M., & Hickling, A. K. (1993). Young Children's Understanding of Pretense. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, *58*(1), i–107. <https://doi.org/10.2307/1166074>
- Hartman, R. R., Stage, S. A., & Webster-Stratton, C. (2003). A growth curve analysis of parent training outcomes: Examining the influence of child risk factors (inattention, impulsivity, and hyperactivity problems), parental and family risk factors. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *44*(3), 388–398.
- Haufe, S., Meinecke, F., Görgen, K., Dähne, S., Haynes, J. D., Blankertz, B., & Bießmann, F. (2014). On the interpretation of weight vectors of linear models in multivariate neuroimaging. *NeuroImage*,

87, 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.10.067>

- Healey, D. M., & Halperin, J. H. (2012). Assessing the effectiveness of ENGAGE (Enhancing Neurocognitive Growth with the Aid of Games and Exercise): A novel early intervention for hyperactive preschoolers. *2nd International Conference of the European Network for Hyperkinetic Disorders. Barcelona, Spain*, 23–25.
- Heckman, J. J., Malofeeva, L., Pinto, R., & Savelyev, P. (2010). Understanding the Mechanisms Through which an Influential Early Childhood Program Boosted Adult Outcomes. *American Economic Review (under Revision)*, 103(6), 2052–2086. <https://doi.org/10.1257/aer.103.6.2052>
- Heckman, J., Pinto, R., & Savelyev, P. (2013). Understanding the mechanisms through which an influential early childhood program boosted adult outcomes. *American Economic Review*, 103(6), 2052–2086.
- Herbert, M. (2000). Parenting skills interventions. *Family Matters: Interfaces between Child and Adult Mental Health*, 237–256.
- Herting, M. M., Gautam, P., Chen, Z., Mezher, A., & Vetter, N. C. (2018). Test-retest reliability of longitudinal task-based fMRI: Implications for developmental studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 33(June 2017), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.07.001>
- Hirsch, P., Nolden, S., Declerck, M., & Koch, I. (2018). Common cognitive control processes underlying performance in task-switching and dual-task contexts. *Advances in Cognitive Psychology*, 14(3), 62–74. <https://doi.org/10.5709/acp-0239-y>
- Hoff, E., Bornstein, M. H., & Bradley, R. H. (2003). *Socioeconomic status, parenting, and child development*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Holmboe, K., & Johnson, M. H. (2005). Educating executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(41), 14479–14480. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507522102>
- Holmes, J., Gathercole, S. E., & Dunning, D. L. (2009). Adaptive training leads to sustained enhancement of poor working memory in children. *Developmental Science*, 12(4), 1–7. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00848.x>
- Hongwanishkul, D., Happaney, K. R., Lee, W. S. C., Zelazo, P. D., Wendy, S., Lee, C., & Lee, S. C. (2010). Developmental Neuropsychology Assessment of Hot and Cool Executive Function in Young Children: Age-Related Changes and Individual Differences. *Developmental Neuropsychology*, 28(October 2011), 37–41. <https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802>
- Houde, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 721–728. <https://doi.org/10.1162/089892900562525>
- Howes, C., & Farver, J. A. (1987). Social pretend play in 2-year-olds: Effects of age of partner. *Early Childhood Research Quarterly*, 2(4), 305–314. [https://doi.org/10.1016/0885-2006\(87\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0885-2006(87)90017-2)
- Hughes, C., Ensor, R., Wilson, A., & Graham, A. (2010). Tracking Executive Function Across the Transition to School: A Latent Variable Approach. *Dev Neuropsychol*, 35(1), 20–36. <https://doi.org/10.1080/87565640903325691>

- Huizinga, M., Dolan, C. V., & van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, *44*(11), 2017–2036. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010>
- Huizinga, M., & van der Molen, M. W. (2011). Task switching and shifting between stopping and going: Developmental change in between-trial control adjustments. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(3), 484–503. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.10.004>
- Hulme, C., & Melby-Lervåg, M. (2012). Current evidence does not support the claims made for CogMed working memory training. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, *1*(3), 197–200. <https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2012.06.006>
- Huster, R. J., Enriquez-Geppert, S., Lavalley, C. F., Falkenstein, M., & Herrmann, C. S. (2013). Electroencephalography of response inhibition tasks: Functional networks and cognitive contributions. *International Journal of Psychophysiology*, *87*(3), 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.001>
- Iani, C., Stella, G., & Rubichi, S. (2014). Response inhibition and adaptations to response conflict in 6- to 8-year-old children: Evidence from the Simon effect. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *76*(4), 1234–1241. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0656-9>
- Ip, C.-T., Ganz, M., Ozenne, B., Sluth, L. B., Gram, M., Viardot, G., L'Hostis, P., Danjou, P., Knudsen, G. M., & Christensen, S. R. (2018). Pre-intervention test-retest reliability of EEG and ERP over four recording intervals. *International Journal of Psychophysiology*, *134*(September), 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.09.007>
- Jacobson, L. A., Williford, A. P., & Pianta, R. C. (2011). The role of executive function in children's competent adjustment to middle school. *Child Neuropsychology*, *17*(3), 255–280. <https://doi.org/10.1080/09297049.2010.535654>
- 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., Shah, P., & Jonides, J. (2014). The role of individual differences in cognitive training and transfer. *Memory & Cognition*, *42*(3), 464–480. <https://doi.org/10.3758/s13421-013-0364-z>
- Jenkins, J., & Astington, J. W. (2000). Theory of Mind and Social Behavior: Causal Models Tested in a Longitudinal Study. *Merrill-Palmer Quarterly*, *46*(2), 203–220. <https://www.jstor.org/stable/23093714>
- Jensen, O., & Tesche, C. D. (2002). Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *European Journal of Neuroscience*, *15*(8), 1395–1399. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x>
- Johnson, M. H. (2000). Functional brain development in infants: Elements of an interactive specialization framework. *Child Development*, *71*(1), 75–81. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00120>
- Johnson, S. B., Riis, J. L., & Noble, K. G. (2016). State of the Art Review: Poverty and the Developing Brain. *Pediatrics*, April. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-3075>
- Jolles, D. D., & Crone, E. a. (2012). Training the developing brain: a neurocognitive perspective.

- Frontiers in Human Neuroscience*, 6(April), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00076>
- Jolles, D. D., Van Buchem, M. A., Crone, E. A., & Rombouts, S. A. R. B. (2013). Functional brain connectivity at rest changes after working memory training. *Human Brain Mapping*, 34(2), 396–406. <https://doi.org/10.1002/hbm.21444>
- Jonkman, L. M., Sniedt, F. L. F., & Kemner, C. (2007). Source localization of the Nogo-N2: A developmental study. *Clinical Neurophysiology*, 118(5), 1069–1077. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.01.017>
- Kagan, J. (1966). Reflection-impulsivity: The generality and dynamics of conceptual tempo. *Journal of Abnormal Psychology*, 71(1), 17.
- Kane, M J, & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general T. Wynn, F. Coolidge / *Journal of Human Evolution*, 46(4), 341–365.
- Kane, Michael J, & Engle, R. W. (2000). Working-memory capacity, proactive interference, and divided attention: Limits on long-term memory retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26(2), 336.
- Karbach, J. (2015). Plasticity of executive functions in childhood and adolescence: Effects of cognitive training interventions. *Revista Argentina de Ciencias Del Comportamiento*, 7(1), 64–70.
- Karbach, J., & Kray, J. (2009). How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training. *Developmental Science*, 12(6), 978–990. <https://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(February), 48. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00048>
- Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, 5(MAY), 322–335. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00390>
- Karmiloff-Smith, A. (2009). Nativism versus neuroconstructivism: rethinking the study of developmental disorders. *Developmental Psychology*, 45(1), 56.
- Karoly, L.A., Kilburn, R., Cannon, J. (2005). *Proven Benefits of Early Childhood Interventions*. 1–5. http://www.rand.org/pubs/research_briefs/RB9145
- Karoly, L. a. (2012). Toward Standardization of Benefit-Cost Analysis of Early Childhood Interventions. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 3(1), 1–43. <https://doi.org/10.1515/2152-2812.1085>
- Karoly, P. (1993). Mechanisms of self-regulation: A systems view. *Annual Review of Psychology*, 44, 23–52.
- Kaufman, A. S. (1990). *Kaufman brief intelligence test: KBIT* (American Guidance Service, Circle Pines, MN).
- Kelly, A. M. C., & Garavan, H. (2005). Human functional neuroimaging of brain changes associated with practice. *Cerebral Cortex*, 15(8), 1089–1102. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi005>
- Kelly, R., Dissanayake, C., Ihsen, E., & Hammond, S. (2011). The Relationship between Symbolic Play and Executive Function in Young Children. *Australasian Journal of Early Childhood*, 36(2), 21–27. <https://doi.org/10.1177/183693911103600204>
- Kerns, J. G. (2006). Anterior cingulate and prefrontal cortex activity in an fMRI study of trial-to-trial adjustments on the Simon task. *NeuroImage*, 33(1), 399–405.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.06.012>

- Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science (New York, N.Y.)*, *303*(5660), 1023–1026. <https://doi.org/10.1126/science.1089910>
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—a review. *Psychological Bulletin*, *136*(5), 849–874. <https://doi.org/10.1037/a0019842>
- Kikuchi, M., Shitamichi, K., Yoshimura, Y., Ueno, S., Hiraishi, H., Hirokawa, T., Munesue, T., Nakatani, H., Tsubokawa, T., Haruta, Y., Oi, M., Niida, Y., Remijn, G. B., Takahashi, T., Suzuki, M., Higashida, H., & Minabe, Y. (2013). Altered brain connectivity in 3- to 7-year-old children with autism spectrum disorder. *NeuroImage: Clinical*, *2*(1), 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2013.03.003>
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. In *Journal of Experimental Psychology* (Vol. 55, Issue 4, pp. 352–358). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/h0043688>
- Klein, A. M., Zwickel, J., Prinz, W., & Frith, U. (2009). Animated triangles: An eye tracking investigation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *62*(6), 1189–1197. <https://doi.org/10.1080/17470210802384214>
- Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(7), 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.05.002>
- Klingberg, T. (2016). Neural basis of cognitive training and development. *Behavioral Sciences*, *10*(i), 97–101.
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Gillberg, C. G., Forsberg, H., & 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/https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010>
- Kloo, D., & Perner, J. (2003). Training Transfer Between Card Sorting and False Belief Understanding: Helping Children Apply Conflicting Descriptions. *Child Development*, *74*(6), 1823–1839. <https://doi.org/10.1046/j.1467-8624.2003.00640.x>
- Kochanska, G., Murray, K., Jacques, T. Y., Koenig, A. L., & Vandegest, K. A. (1996). Inhibitory Control in Young Children and Its Role in Emerging Internalization. *Child Development*, *67*(2), 490–507. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1996.tb01747.x>
- Kolb, B., & Gibb, R. (2011). 2011- Brain Plasticity and Behaviour in the Developing Brain. *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, *20*(4), 265–276. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00005-9>
- König, P., Engel, A. K., Roelfsema, P. R., & Singer, W. (1995). How precise is neuronal synchronization? *Neural Computation*, *7*(3), 469–485.
- Kopp, B., Rist, F., & Mattler, U. (1996). N200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control. *Psychophysiology*, *33*, 282–294.

- Kopp, Bruno, Lange, F., Howe, J., & Wessel, K. (2014). Age-related changes in neural recruitment for cognitive control. *Brain and Cognition*, 85(1), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.12.008>
- Koriat, A., Ma'ayan, H., & Nussinson, R. (2006). The intricate relationships between monitoring and control in metacognition: Lessons for the cause-and-effect relation between subjective experience and behavior. In *Journal of Experimental Psychology: General* (Vol. 135, Issue 1, pp. 36–69). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.135.1.36>
- Korkman, M. (1998). NEPSY. A developmental neurop-sychological assessment. *Test Materials and Manual*.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional Overlap: Cognitive Basis for Stimulus-Response Compatibility-A Model and Taxonomy. *Psychological Review*, 97(2), 253–270. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.97.2.253>
- Kornblum, S., & Lee, J.-W. (1995). Stimulus-response compatibility with relevant and irrelevant stimulus dimensions that do and do not overlap with the response. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(4), 855.
- Krafft, K. C., & Berk, L. E. (1998). Private speech in two preschools: Significance of open-ended activities and make-believe play for verbal self-regulation. *Early Childhood Research Quarterly*, 13(4), 637–658. [https://doi.org/10.1016/s0885-2006\(99\)80065-9](https://doi.org/10.1016/s0885-2006(99)80065-9)
- 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. <https://doi.org/10.1111/cdep.12027>
- Kray, J., Karbach, J., & Blaye, A. (2012). The influence of stimulus-set size on developmental changes in cognitive control and conflict adaptation. *Acta Psychologica*, 140(2), 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.03.005>
- Kuo, C.-C., Zhang, C., Rissman, R. A., & Chiu, A. W. L. (2014). Long-Term Electrophysiological and Behavioral Analysis on the Improvement of Visual Working Memory Load, Training Gains, and Transfer Benefits. *Journal of Behavioral and Brain Science*, 04(05), 234–246. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2014.45025>
- Ladd, G. W., Buhs, E. S., & Seid, M. (2000). Children's Initial Sentiments About Kindergarten: Is School Liking an Antecedent of Early Classroom Participation and Achievement? *Merrill-Palmer Quarterly*, 46(2), 255–279. <http://www.jstor.org/stable/23093716>
- Lakes, K. D., Kettler, R. J., Schmidt, J., Haynes, M., Feeney-Kettler, K., Kamptner, L., Swanson, J., & Tamm, L. (2009). The CUIDAR Early Intervention Parent Training Program for Preschoolers at Risk for Behavioral Disorders. *Journal of Early Intervention*, 31(2), 167–178. <https://doi.org/10.1177/1053815109331861>
- Lalonde, C. E., & Chandler, M. J. (1995). False belief understanding goes to school: On the social-emotional consequences of coming early or late to a first theory of mind. *Cognition and Emotion*, 9(2–3), 167–185. <https://doi.org/10.1080/02699939508409007>
- Lane, J. D., Ledford, J. R., Shepley, C., Mataras, T. K., Ayres, K. M., & Davis, A. B. (2016). A Brief Coaching Intervention for Teaching Naturalistic Strategies to Parents. *Journal of Early Intervention*,

38(3), 135–150. <https://doi.org/10.1177/1053815116663178>

- Lanoë, C., Rossi, S., Froment, L., & Lubin, A. (2015). Le programme pédagogique neuroéducatif «À la découverte de mon cerveau»: Quels bénéfices pour les élèves d'école élémentaire? = The pedagogical neuroscience course "To the discovery of my brain": What benefits for elementary school children? *A.N.A.E. Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez l'Enfant*, 27(1[134]), 55–62. celine.lanoe@unicaen.fr
- Lanoë, C., Rossi, S., Kancel, S., Lecellier, F., Dufour, J., Chasse, M., Sonnet, C., Hedreuil, M., & Lubin, A. (2018). *Le programme pédagogique métacognitif « Mon cerveau, ma boîte à trésors » Quels bénéfices pour les élèves d'école maternelle ?*
- Larson, M. J., Clayson, P. E., & Baldwin, S. A. (2012). Performance monitoring following conflict: Internal adjustments in cognitive control? *Neuropsychologia*, 50(3), 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.12.021>
- Lawson, G. M., & Farah, M. J. (2017). Executive function as a mediator between SES and academic achievement throughout childhood. *International Journal of Behavioral Development*, 41(1), 94–104. <https://doi.org/10.1177/0165025415603489>
- Lee, K., Bull, R., & Ho, R. M. H. (2013). Developmental changes in executive functioning. *Child Development*, 84(6), 1933–1953. <https://doi.org/10.1111/cdev.12096>
- 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. <https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Leisman, G., Mualem, R., & Mughrabi, S. K. (2015). The neurological development of the child with the educational enrichment in mind. *Psicología Educativa*, 21(2), 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.pse.2015.08.006>
- Leong, D. J., & Bodrova, E. (2012). Assessing and scaffolding make-believe play. *YC Young Children*, 67(1), 28–34.
- Lerner, M. D., & Lonigan, C. J. (2014). Executive Function Among Preschool Children: Unitary Versus Distinct Abilities. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 36(4), 626–639. <https://doi.org/10.1007/s10862-014-9424-3>
- Letarte, M.-J., Normandeau, S., & Allard, J. (2010). Effectiveness of a parent training program "Incredible Years" in a child protection service. *Child Abuse & Neglect*, 34(4), 253–261.
- Lewis, M. D., Lamm, C., Segalowitz, S. J., Stieben, J., & Zelazo, P. D. (2006). Neurophysiological correlates of emotion regulation in children and adolescents. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(3), 430–443. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.3.430>
- Liew, J. (2012). Effortful Control, Executive Functions, and Education: Bringing Self-Regulatory and Social-Emotional Competencies to the Table. *Child Development Perspectives*, 6(2), 105–111. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00196.x>
- Lillard, A. S., Lerner, M. D., Hopkins, E. J., Dore, R. a., Smith, E. D., & Palmquist, C. M. (2012). The Impact of Pretend Play on Children's Development: A Review of the Evidence. *Psychological Bulletin*, 139(1), 1–34. <https://doi.org/10.1037/a0029321>
- Lipina, S. J., Martelli, M. I., Vuelta, B., & Colombo, J. A. (2005). Performance on the A-not-B task of

- Argentinean infants from unsatisfied and satisfied basic needs homes. *Interamerican Journal of Psychology*, 39(1).
- Liu, A. (2019). Can non-cognitive skills compensate for background disadvantage? -- the moderation of non-cognitive skills on family socioeconomic status and achievement during early childhood and early adolescence. *Social Science Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ssresearch.2019.04.019>
- 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(March), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep14200>
- Liu, Z. X., Woltering, S., & Lewis, M. D. (2014). Developmental change in EEG theta activity in the medial prefrontal cortex during response control. *NeuroImage*, 85, 873–887. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.054>
- Lorsbach, T. C., & Reimer, J. F. (2008). Context Processing and Cognitive Control in Children and Young Adults. *The Journal of Genetic Psychology*, 169(1), 34–50. <http://lama.univ-amu.fr/login?url=http://search.proquest.com/docview/228460038?accountid=15337>
- Lövdén, M., Bäckman, L., Lindenberger, U., Schaefer, S., & Schmiedek, F. (2010). A theoretical framework for the study of adult cognitive plasticity. *Psychological Bulletin*, 136(4), 659.
- Löwel, S., & Singer, W. (1992). Selection of intrinsic horizontal connections in the visual cortex by correlated neuronal activity. *Science*, 255(5041), 209–212. <https://doi.org/10.1126/science.1372754>
- Luria, A. (1966). Higher cortical functions in man. *London: Tavistock*.
- Lussier, F. (2009). Programme d'intervention pour favoriser le développement des fonctions attentionnelles et exécutives. *Actualités En Rééducation Neuropsychologiques*, 103–117.
- Lyons, K. E., & Zelazo, P. D. (2011). Monitoring, metacognition, and executive function. Elucidating the role of self-reflection in the development of self-regulation. In *Advances in Child Development and Behavior* (1st ed., Vol. 40). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386491-8.00010-4>
- MacDonald, A. W. (2000). Dissociating the Role of the Dorsolateral Prefrontal and Anterior Cingulate Cortex in Cognitive Control. *Science*, 288(5472), 1835–1838. <https://doi.org/10.1126/science.288.5472.1835>
- Manuilenko, Z. V. (1975). The Development of Voluntary Behavior in Preschool-Age Children. *Soviet Psychology*, 13(4), 65–116. <https://doi.org/10.2753/rpo1061-0405130465>
- Marie, T. B. (2009). Executive Function: The Search for an Integrated Account. *Current Directions in Psychological Science*, 18(2), 89–94. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01615.x>
- Matoušek, M., & Petersén, I. (1973). Frequency analysis of the EEG in normal children and in normal adolescents. In *Automation of clinical electroencephalography* (pp. 75–102). Raven Press New York.
- Mayr, U., & Keele, S. W. (2000). Changing internal constraints on action: The role of backward inhibition. In *Journal of Experimental Psychology: General* (Vol. 129, Issue 1, pp. 4–26). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.129.1.4>
- McClelland, M. M., Acock, A. C., Piccinin, A., Rhea, S. A., & Stallings, M. C. (2013). Relations between preschool attention span-persistence and age 25 educational outcomes. *Early Childhood*

- Research Quarterly*, 28(2), 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2012.07.008>
- McClelland, M. M., & Cameron, C. E. (2012). Self-Regulation Early Childhood: Improving Conceptual Clarity and Developing Ecologically Valid Measures. *Child Development Perspectives*, 6(2), 136–142. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00191.x>
- McClelland, M. M., Cameron, C. E., Connor, C. M., Farris, C. L., Jewkes, A. M., & Morrison, F. J. (2007). Links between behavioral regulation and preschoolers' literacy, vocabulary, and math skills. *Developmental Psychology*, 43(4), 947–959. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.4.947>
- McDermott, Jennifer M., Westerlund, A., Zeanah, C. H., Nelson, C. A., & Fox, N. A. (2012). Early adversity and neural correlates of executive function: Implications for academic adjustment. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(Suppl 1), S59–S66. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.008>
- McDermott, Jennifer Martin, Pears, K. C., Bruce, J., Kim, H. K., Roos, L., Yoerger, K. L., & Fisher, P. A. (2018). Improving kindergarten readiness in children with developmental disabilities: Changes in neural correlates of response monitoring. *Applied Neuropsychology: Child*, 7(3), 187–199. <https://doi.org/10.1080/21622965.2017.1286239>
- McLoyd, V. C. (1998). Socioeconomic disadvantage and child development. In *American Psychologist* (Vol. 53, Issue 2, pp. 185–204). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.53.2.185>
- Melby-Lervåg, M., & Hulme, C. (2013). Is Working Memory Training Effective? A Meta-Analytic Review. *Developmental Psychology*, 49(2), 270–291. <https://doi.org/10.1037/a0028228>
- Merrell, K. W. (1994). *Preschool and Kindergarten Behavior Scales. Test Manual*. ERIC.
- Metsärinne, M., Kallio, M., & Virta, K. (2014). Pupils' readiness for self-regulated learning in the forethought phase of Exploratory Production. *International Journal of Technology and Design Education*, 25(1), 85–108. <https://doi.org/10.1007/s10798-014-9273-0>
- Meuwissen, A. S., & Carlson, S. M. (2015). Fathers matter: The role of father parenting in preschoolers' executive function development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 140, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.06.010>
- Meyer, M., Endedijk, H. M., van Ede, F., & Hunnius, S. (2019). Theta oscillations in 4-year-olds are sensitive to task engagement and task demands. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42615-x>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An Integrative Theory of Prefrontal Cortex Function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Miller, E. K., & Desimone, R. (1994). *Neuronal mechanisms*. 263(JANUARY), 127.
- Miller, M. R., Giesbrecht, G. F., Müller, U., McInerney, R. J., & Kerns, K. A. (2012). A Latent Variable Approach to Determining the Structure of Executive Function in Preschool Children. *Journal of Cognition and Development*, 13(3), 395–423. <https://doi.org/10.1080/15248372.2011.585478>
- Miltner, W. H. R., Braun, C. H., & Coles, M. G. H. (1997). Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a “generic” neural system for error detection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(6), 788–798. <https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.6.788>

- Missonnier, P., Deiber, M. P., Gold, G., Millet, P., Gex-Fabry Pun, M., Fazio-Costa, L., Giannakopoulos, P., & Ibáñez, V. (2006). Frontal theta event-related synchronization: Comparison of directed attention and working memory load effects. *Journal of Neural Transmission*, *113*(10), 1477–1486. <https://doi.org/10.1007/s00702-005-0443-9>
- 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. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Miyake, A., & Shah, P. (1999). *Models of Working Memory: Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control*. Cambridge University Press.
- Miyake, Akira, & 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. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Mizuhara, H., Wang, L.-Q., Kobayashi, K., & Yamaguchi, Y. (2004). A long-range cortical network emerging with theta oscillation in a mental task. *Neuroreport*, *15*(8), 1233–1238. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000126755.09715.b3>
- Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., Houts, R., Poulton, R., Roberts, B. W., Ross, S., Sears, M. R., Thomson, W. M., & Caspi, A. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(7), 2693–2698. <https://doi.org/10.1073/pnas.1010076108>
- Monette, Sebastien, Bigras, M., & Guay, M. C. (2011). The role of the executive functions in school achievement at the end of Grade 1. *Journal of Experimental Child Psychology*, *109*(2), 158–173. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.008>
- Monette, Sébastien, Bigras, M., & Lafrenière, M.-A. (2015). Structure of executive functions in typically developing kindergarteners. *Journal of Experimental Child Psychology*, *140*, 120–139. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.07.005>
- Monsell, S., Yeung, N., & Azuma, R. (2000). Is it easier to switch to weaker set. *Psychological Research*, *63*, 250–264.
- Morasch, K. C., & Bell, M. A. (2011). The role of inhibitory control in behavioral and physiological expressions of toddler executive function. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(3), 593–606. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.07.003>
- Moreau, D., & Conway, A. R. A. (2014). The case for an ecological approach to cognitive training. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(7), 334–336. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.03.009>
- Moreau, D., Morrison, A. B., & Conway, A. R. A. (2015). An ecological approach to cognitive enhancement: Complex motor training. *Acta Psychologica*, *157*, 44–55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.02.007>
- Moreno, S., Bialystok, E., Barac, R., Schellenberg, E. G., Cepeda, N. J., & Chau, T. (2011). Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychological Science*, *22*(11), 1425–1433. <https://doi.org/10.1177/0956797611416999>
- Moriguchi, Y. (2014). The early development of executive function and its relation to social interaction:

- a brief review. *Frontiers in Psychology*, 5(April), 388. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00388>
- Morton, J. B., Bosma, R., & Ansari, D. (2009). Age-related changes in brain activation associated with dimensional shifts of attention: An fMRI study. *NeuroImage*, 46(1), 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.037>
- Moshman, D. (2018). Metacognitive theories revisited. *Educational Psychology Review*, 30(2), 599–606.
- Murias, M., Swanson, J. M., & Srinivasan, R. (2007). Functional Connectivity of Frontal Cortex in Healthy and ADHD Children Reflected in EEG Coherence. *Cerebral Cortex*, 17(8), 1788–1799. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl089>
- Nayfeld, I., Fuccillo, J., & Greenfield, D. B. (2013). Executive functions in early learning: Extending the relationship between executive functions and school readiness to science. *Learning and Individual Differences*, 26, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.04.011>
- Neville, H. J., Stevens, C., Pakulak, E., Bell, T. a, Fanning, J., Klein, S., & Isbell, E. (2013). Family-based training program improves brain function, cognition, and behavior in lower socioeconomic status preschoolers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(29), 12138–12143. <https://doi.org/10.1073/pnas.1304437110>
- 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 and Behavioral Neuroscience*, 12(2), 241–268. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0083-5>
- Nigbur, R., Ivanova, G., & Stürmer, B. (2011a). Clinical Neurophysiology Theta power as a marker for cognitive interference. *Clinical Neurophysiology*, 122(11), 2185–2194. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.03.030>
- Nigbur, R., Ivanova, G., & Stürmer, B. (2011b). Theta power as a marker for cognitive interference. *Clinical Neurophysiology*, 122(11), 2185–2194. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.03.030>
- Nijhof, S. L., Vinkers, C. H., van Geelen, S. M., Duijff, S. N., Achterberg, E. J. M., van der Net, J., Veltkamp, R. C., Grootenhuis, M. A., van de Putte, E. M., Hillegers, M. H. J., van der Brug, A. W., Wierenga, C. J., Benders, M. J. N. L., Engels, R. C. M. E., van der Ent, C. K., Vanderschuren, L. J. M. J., & Lesscher, H. M. B. (2018). Healthy play, better coping: The importance of play for the development of children in health and disease. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 95(September), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.09.024>
- Noble, K. G., McCandliss, B. D., & Farah, M. J. (2007). Socioeconomic gradients predict individual differences in neurocognitive abilities. *Developmental Science*, 10(4), 464–480. <https://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. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00394.x>
- Nock, M. K., & Kazdin, A. E. (2001). Parent expectancies for child therapy: Assessment and relation to participation in treatment. *Journal of Child and Family Studies*, 10(2), 155–180.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed. *Consciousness and Self-Regulation*,

- 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0629-1>
- Normandeau, S., & Venet, M. (2000). Comment intervenir auprès et par l'entremise des parents. *Prévention Des Problèmes D'adaptation Chez Les Enfants et Les Adolescents*, 1, 141–188.
- Notebaert, W., Gevers, W., Verbruggen, F., & Liefoghe, B. (2006). Top-down and bottom-up sequential modulations of congruency effects. *Psychonomic Bulletin and Review*, 13(1), 112–117. <https://doi.org/10.3758/BF03193821>
- Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75–79. <https://doi.org/10.1038/nn1165>
- Orekhova, E. V., Stroganova, T. A., & Posikera, I. N. (1999). Theta synchronization during sustained anticipatory attention in infants over the second half of the first year of life. *International Journal of Psychophysiology*, 32(2), 151–172. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(99\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(99)00011-2)
- Pandey, A., Hale, D., Das, S., Goddings, A.-L., Blakemore, S.-J., & Viner, R. M. (2018). Effectiveness of Universal Self-regulation–Based Interventions in Children and Adolescents. *JAMA Pediatrics*, 172(6), 566. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2018.0232>
- Peake, P. K., Mischel, W., & Hebl, M. (2002). Strategic attention deployment for delay of gratification in working and waiting situations. *Developmental Psychology*, 38(2), 313–326. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.38.2.313>
- Penner, I.-K., Vogt, A., Stöcklin, M., Gschwind, L., Opwis, K., & Calabrese, P. (2012). Computerised working memory training in healthy adults: A comparison of two different training schedules. *Neuropsychological Rehabilitation*, 22(5), 716–733. <https://doi.org/10.1080/09602011.2012.686883>
- Penner, Z. (1999). Screeningverfahren zur Feststellung von Störungen in der Grammatikentwicklung. Gebrauchsanweisungen für die BenutzerInnen. *Schriftenreihe Des Heilpädagogischen Seminars Zürich*, 14.
- Petersen, M., Eckert, A. S., Von Banchet, G. S., Heppelmann, B., Klusch, A., & Kniffki, K.-D. (1998). Plasticity in the expression of bradykinin binding sites in sensory neurons after mechanical nerve injury. *Neuroscience*, 83(3), 949–959.
- Petrides, M., & Milner, B. (1982). Deficits on subject-ordered tasks after frontal-and temporal-lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, 20(3), 249–262.
- Piaget, J. (1954). *Les relations entre l'intelligence et l'affectivité dans le développement de l'enfant*.
- Pianta, R. C. (1997). Adult–Child Relationship Processes and Early Schooling. *Early Education and Development*, 8(1), 11–26. https://doi.org/10.1207/s15566935eed0801_2
- Piccolo, L. R., Merz, E. C., He, X., Sowell, E. R., & Noble, K. G. (2016). Age-related differences in cortical thickness vary by socioeconomic status. *PLoS ONE*, 11(9), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162511>
- Pietto, M. L., Giovannetti, F., Segretin, M. S., Belloli, L. M. L., Lopez-Rosenfeld, M., Goldin, A. P., Fernández-Slezak, D., Kamienkowski, J. E., & Lipina, S. J. (2018). Enhancement of inhibitory control in a sample of preschoolers from poor homes after cognitive training in a kindergarten setting: Cognitive and ERP evidence. *Trends in Neuroscience and Education*, 13(November), 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2018.11.004>

- Plichta, M. M., Schwarz, A. J., Grimm, O., Morgen, K., Mier, D., Haddad, L., Gerdes, A. B. M., Sauer, C., Tost, H., Esslinger, C., Colman, P., Wilson, F., Kirsch, P., & Meyer-Lindenberg, A. (2012). Test-retest reliability of evoked BOLD signals from a cognitive-emotive fMRI test battery. *NeuroImage*, *60*(3), 1746–1758. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.01.129>
- Poldrack, R. A. (2000). Imaging brain plasticity: conceptual and methodological issues—a theoretical review. *Neuroimage*, *12*(1), 1–13.
- Ponitz, C. C., McClelland, M. M., Matthews, J. S., & Morrison, F. J. (2009). A structured observation of behavioral self-regulation and its contribution to kindergarten outcomes. *Developmental Psychology*, *45*(3), 605.
- Pozuelos, J. P., Combata, L. M., Abundis, A., Paz-Alonso, P. M., Conejero, Á., Guerra, S., & Rueda, M. R. (2019). Metacognitive scaffolding boosts cognitive and neural benefits following executive attention training in children. *Developmental Science*, *22*(2), 1–15. <https://doi.org/10.1111/desc.12756>
- Pozuelos, J. P., Combata, L. M., Abundis, A., Paz-Alonso, P. M., Conejero, Á., Guerra, S., & Rueda, M. R. (2019). Metacognitive scaffolding boosts cognitive and neural benefits following executive attention training in children. *Developmental Science*, *22*(2), 0–2. <https://doi.org/10.1111/desc.12756>
- Praamstra, P., Kleine, B. U., & Schnitzler, A. (1999). Magnetic stimulation of the dorsal premotor cortex modulates the Simon effect. *NeuroReport*, *10*(17), 3671–3674. <https://doi.org/10.1097/00001756-199911260-00038>
- Prakash, R. S., De Leon, A. A., Mourany, L., Lee, H., Voss, M. W., Boot, W. R., Basak, C., Fabiani, M., Gratton, G., & Kramer, A. F. (2012). Examining neural correlates of skill acquisition in a complex videogame training program. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*(May), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00115>
- Priest, J. S., Silbergliitt, B., Hall, S., & Estrem, T. L. (2000). *Progress on preschool IGDIs for early literacy. Presentation at Heartland Area*. Education Association Des Moines, IA.
- Qu, L. (2011). Two is better than one, but mine is better than ours: Preschoolers' executive function during co-play. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(3), 549–566. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.010>
- Rabipour, S., & Raz, A. (2012). Training the brain: Fact and fad in cognitive and behavioral remediation. *Brain and Cognition*, *79*(2), 159–179. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.006>
- Rapport, M. D., Orban, S. A., Kofler, M. J., & Friedman, L. M. (2013). Do programs designed to train working memory, other executive functions, and attention benefit children with ADHD? A meta-analytic review of cognitive, academic, and behavioral outcomes. *Clinical Psychology Review*, *33*(8), 1237–1252.
- Raven, J. C. (1947). Raven's progressive matrices test. *London: HK Lewis*.
- Raven, J. C. (1983). Manual for Raven's progressive matrices and vocabulary scales. *Standard Progressive Matrices*.
- Raver, C. C., & Knitze, J. (2002). Promoting the Emotional Well-Being of Children and Families: Ready to Enter: What Research Tells Policymakers About Strategies to Promote Social and Emotional

- School Readiness Among Three- and Four-Year-Old Children. *NCCP Mailman School of Public Health*, 1, 30.
- Rebok, G. W., Carlson, M. C., & Langbaum, J. B. S. (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.
- Reitan, R. M. (1958). Validity of the Trail Making Test as an indicator. *Perceptual and Motor Skills*, 8(1), 271–276. <https://doi.org/https://doi.org/10.2466/pms.1958.8.3.271>
- Richardson, C., Anderson, M., Reid, C. L., & Fox, A. M. (2018). Development of inhibition and switching: A longitudinal study of the maturation of interference suppression and reversal processes during childhood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 34, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.03.002>
- Ridderinkhof, K. R., Van Den Wildenberg, W. P. M., Segalowitz, S. J., & Carter, C. S. (2004). Neurocognitive mechanisms of cognitive control: The role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward-based learning. *Brain and Cognition*, 56(2 SPEC. ISS.), 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.09.016>
- Ridderinkhof, K. R., & van der Molen, M. W. (1995). A Psychophysiological Analysis of Developmental Differences in the Ability to Resist Interference. *Child Development*, 66(4), 1040–1056. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1995.tb00921.x>
- Riggs, N. R., Jahromi, L. B., Razza, R. P., Dillworth-Bart, J. E., & Mueller, U. (2006). Executive function and the promotion of social-emotional competence. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 27(4), 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2006.04.002>
- Roebers, C. M. (2017). Executive function and metacognition: Towards a unifying framework of cognitive self-regulation. *Developmental Review*, 45, 31–51. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2017.04.001>
- Roid, G. H. (2003). Stanford-Binet intelligence scales--fifth edition. *Itasca, IL: Riverside Publishing*.
- 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. *Developmental Science*, 14(5), 1161–1175. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01068.x>
- Rosenzweig, M. R., & Bennett, E. L. (1996). Psychobiology of plasticity: Effects of training and experience on brain and behavior. *Behavioural Brain Research*, 78(1), 57–65. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(95\)00216-2](https://doi.org/10.1016/0166-4328(95)00216-2)
- Rossi, S., Lanoë, C., Poirel, N., Pineau, A., Houdé, O., & Lubin, A. (2015). When I Met my brain: Participating in a neuroimaging study influences children's naïve mind-brain conceptions. *Trends in Neuroscience and Education*, 4(4), 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.07.001>
- Rothbart, M. K., Ahadi, S. A., Hershey, K. L., & Fisher, P. (2001). Investigations of temperament at three to seven years: The Children's Behavior Questionnaire. *Child Development*, 72(5), 1394–1408.
- Röthlisberger, M., Neuenschwander, R., Cimeli, P., Michel, E., & Roebers, C. M. (2012). Improving executive functions in 5- and 6-year-olds: Evaluation of a small group intervention in prekindergarten and kindergarten children. *Infant and Child Development*, 21, 411–429. <https://doi.org/10.1002/icd>
- Roy, A., Fournet, N., Roulin, J. L., & Le Gall, D. (2013). BRIEF-Inventaire d'Evaluation Comportementale

des Fonctions Exécutives (Adaptation Française de Gioia GA, Isquith PK, Guy SC, Kenworthy L).
Paris: Hogrefe France Editions.

- Rueda, M. R. (2005). The Development of Executive Attention: Contributions to the Emergence of Self-Regulation. *Developmental Neuropsychology*, 28(October 2011), 37–41. <https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802>
- Rueda, M. R., Checa, P., & Cómbita, 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(SUPPL. 1), S192–S204. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.004>
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P., & Posner, M. I. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, 42(8), 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Rueda, M. R., Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Davis-Stober, C. P. (2004). Development of the time course for processing conflict: an event-related potentials study with 4 year olds and adults. *BMC Neuroscience*, 5, 39. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-5-39>
- Sabbagh, M. A., Xu, F., Carlson, S. M., Moses, L. J., & Lee, K. (2006). The Development of Executive Functioning and Theory of Mind. A Comparison of Chinese and U.S. Preschoolers. *Psychological Science*, 17(1), 74–81. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01667.x>
- Saby, J. N., & Marshall, P. J. (2012). The utility of EEG band power analysis in the study of infancy and early childhood. *Developmental Neuropsychology*, 37(3), 253–273. <https://doi.org/10.1080/87565641.2011.614663>
- Sakai, K. (2008). Task Set and Prefrontal Cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 219–245. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125642>
- Salminen, T., Strobach, T., & Schubert, T. (2012). On the impacts of working memory training on executive functioning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00166>
- Sauseng, P., Hoppe, J., Klimesch, W., Gerloff, C., & Hummel, F. C. (2007). Dissociation of sustained attention from central executive functions: Local activity and interregional connectivity in the theta range. *European Journal of Neuroscience*, 25(2), 587–593. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05286.x>
- Sauseng, P., Klimesch, W., Freunberger, R., Pecherstorfer, T., Hanslmayr, S., & Doppelmayr, M. (2006). Relevance of EEG alpha and theta oscillations during task switching. *Experimental Brain Research*, 170(3), 295–301. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0211-y>
- Sauseng, Paul, Griesmayr, B., Freunberger, R., & Klimesch, W. (2010). Control mechanisms in working memory: A possible function of EEG theta oscillations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(7), 1015–1022. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.12.006>
- Schmitt, S. A., McClelland, M. M., Tominey, S. L., & Acock, A. C. (2015). Strengthening school readiness for Head Start children: Evaluation of a self-regulation intervention. *Early Childhood Research Quarterly*, 30(PA), 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2014.08.001>
- Schraw, G., & Moshman, D. (1995). Metacognitive theories. *Educational Psychology Review*, 7(4), 351–

371. <https://doi.org/10.1007/BF02212307>

- Schuch, S., & Koch, I. (2003). The role of response selection for inhibition of task sets in task shifting. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(1), 92–105. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.1.92>
- Scourfield, J., John, B., Martin, N., & McGuffin, P. (2004). The development of prosocial behaviour in children and adolescents: A twin study. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 45(5), 927–935. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.t01-1-00286.x>
- Sethi, A., Mischel, W., Aber, J. L., Shoda, Y., & Rodriguez, M. L. (2000). The role of strategic attention deployment in development of self-regulation: Predicting preschoolers' delay of gratification from mother–toddler interactions. In *Developmental Psychology* (Vol. 36, Issue 6, pp. 767–777). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.36.6.767>
- Sewell, W. H., Haller, A. O., & Portes, A. (1969). The educational and early occupational attainment process. *American Sociological Review*, 82–92.
- Shackman, A. J., Salomons, T. V., Slagter, H. A., Fox, A. S., Winter, J. J., & Davidson, R. J. (2011). The integration of negative affect, pain and cognitive control in the cingulate cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(3), 154–167. <https://doi.org/10.1038/nrn2994>
- Shenhav, A., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2013). The expected value of control: An integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, 79(2), 217–240. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.007>
- Sheridan, M. A., & McLaughlin, K. A. (2016). Neurobiological models of the impact of adversity on education. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.05.013>
- Sheridan, M., Kharitonova, M., Martin, R. E., Chatterjee, A., & Gabrieli, J. D. E. (2014). Neural Substrates of the Development of Cognitive Control in Children Ages 5-10 Years. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(8), 1840–1850. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00597
- Shimamura, A. P. (2000). Toward a Cognitive Neuroscience of Metacognition. *Consciousness and Cognition*, 9(2), 313–323. <https://doi.org/10.1006/ccog.2000.0450>
- Shinaver, C. S., Entwistle, P. C., & Söderqvist, S. (2014). Cogmed WM training: reviewing the reviews. *Applied Neuropsychology. Child*, 3(3), 163–172. <https://doi.org/10.1080/21622965.2013.875314>
- Shipstead, Z., Hicks, K. L., & Engle, R. W. (2012). Cogmed working memory training: Does the evidence support the claims? *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 1(3), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2012.06.003>
- Shitova, N., Roelofs, A., Schriefers, H., Bastiaansen, M., & Schoffelen, J. M. (2017). Control adjustments in speaking: Electrophysiology of the Gratton effect in picture naming. *Cortex*, 92, 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.04.017>
- Simon, J. R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. In *Journal of Experimental Psychology* (Vol. 81, Issue 1, pp. 174–176). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/h0027448>
- Simonet, M., Crettaz von Roten, F., Spierer, L., & Barral, J. (2019). Executive control training does not generalize, even when associated with plastic changes in domain-general prefrontal areas.

- NeuroImage*, 197(March), 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.010>
- Singer, J. L., & Singer, D. G. (1986). Family experiences and television viewing as predictors of children's imagination, restlessness, and aggression. *Journal of Social Issues*, 42(3), 107–124.
- Smith-Donald, R., Raver, C. C., Hayes, T., & Richardson, B. (2007). Preliminary construct and concurrent validity of the Preschool Self-regulation Assessment (PSRA) for field-based research. *Early Childhood Research Quarterly*, 22(2), 173–187.
- Smith, C. L., & Bell, M. A. (2010). Stability in infant frontal asymmetry as a predictor of toddlerhood internalizing and externalizing behaviors. *Developmental Psychobiology*, 52(2), 158–167. <https://doi.org/10.1002/dev.20427>
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). *Frontal Lobes*. 283(MARCH), 1657–1662.
- Smith, H. (2010). The effects of a drama-based language intervention on the development of theory of mind and executive function in urban kindergarten children. *Dissertation Abstracts International: Section B: The Sciences and Engineering*, 3125. http://myaccess.library.utoronto.ca/login?url=http://search.proquest.com/docview/916528278?accountid=14771%5Cnhttp://bf4dv7zn3u.search.serialssolutions.com/?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&rft_id=info:sid/PsycINFO&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:k
- Smulders, S. F. A., Notebaert, W., Meijer, M., Crone, E. A., van der Molen, M. W., & Soetens, E. (2005). Sequential effects on speeded information processing: A developmental study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 90(3), 208–234. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.10.003>
- Soetens, E., Boer, L. C., & Hueting, J. E. (1985). Expectancy or automatic facilitation? Separating sequential effects in two-choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(5), 598.
- Sonuga-Barke, E. J. S., Daley, D., & Thompson, M. (2002). Does maternal ADHD reduce the effectiveness of parent training for preschool children's ADHD? *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 41(6), 696–702.
- Sonuga-Barke, E. J. S., Daley, D., Thompson, M., Laver-Bradbury, C., & Weeks, A. (2001). Parent-based therapies for preschool attention-deficit/hyperactivity disorder: a randomized, controlled trial with a community sample. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 40(4), 402–408.
- Sowell, E R, Thompson, P. M., Holmes, C. J., Jernigan, T. L., & Toga, a W. (1999). In vivo evidence for post-adolescent brain maturation in frontal and striatal regions. *Nature Neuroscience*, 2(10), 859–861. <https://doi.org/10.1038/13154>
- Sowell, Elizabeth R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience*, 6(3), 309–315. <https://doi.org/10.1038/nn1008>
- 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. <https://doi.org/10.1080/17470210500162854>
- Steele, H., Bate, J., Steele, M., Dube, S. R., Danskin, K., Knafo, H., Nikitiades, A., Bonuck, K., Meissner, P., & Murphy, A. (2016). Adverse childhood experiences, poverty, and parenting stress. *Canadian*

- Journal of Behavioural Science/Revue Canadienne Des Sciences Du Comportement*, 48(1), 32.
- Stern, R. M., Stern, R. M., Ray, W. J., & Quigley, K. S. (2001). *Psychophysiological Recording*. Oxford University Press. <https://books.google.fr/books?id=9WmvzrkZdv8C>
- Stroganova, T. A., Orekhova, E. V., & Posikera, I. N. (1999). EEG alpha rhythm in infants. *Clinical Neurophysiology*, 110(6), 997–1012. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(98\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(98)00009-1)
- Strommen, E. A. (1973). *Verbal Self-Regulation in a Children ' s Game : Impulsive Errors on " Simon Says " Author (s) : Ellen A . Strommen Published by : Wiley on behalf of the Society for Research in Child Development Stable URL : https://www.jstor.org/stable/1127737 REFERENCE. 44(4), 849–853.*
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
- Stürmer, B., & Leuthold, H. (2003). Control over response priming in visuomotor processing: A lateralized event-related potential study. *Experimental Brain Research*, 153(1), 35–44. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1579-1>
- Stürmer, B., Seiss, E., & Leuthold, H. (2005). Executive control in the Simon task: A dual-task examination of response priming and its suppression. *European Journal of Cognitive Psychology*, 17(5), 590–618. <https://doi.org/10.1080/09541440540000077>
- Stuss, D T, & Knight, R. T. (2013). *Principles of Frontal Lobe Function*. OUP USA. <https://books.google.fr/books?id=GHRAhCMGj2EC>
- Stuss, Donald T. (2011). Functions of the frontal lobes: Relation to executive functions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17(5), 759–765. <https://doi.org/10.1017/S1355617711000695>
- Takacs, Z. K., & Kassai, R. (2019). The efficacy of different interventions to foster children's executive function skills: A series of meta-analyses. *Psychological Bulletin*, 145(7), 653–697. <https://doi.org/10.1037/bul0000195>
- Tamm, L., Menon, V., & Reiss, A. L. (2002). Maturation of Brain Function Associated With Response Inhibition. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 41(10), 1231–1238. <https://doi.org/10.1097/01.CHI.0000020272.43550.5E>
- Taylor, M., & Carlson, S. M. (1997). The relation between individual differences in fantasy and theory of mind. *Child Development*, 68(3), 436–455.
- Temple, J. A., & Reynolds, A. J. (2007). Benefits and costs of investments in preschool education: Evidence from the Child–Parent Centers and related programs. *Economics of Education Review*, 26(1), 126–144. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2005.11.004>
- Thibodeau, R. B., Gilpin, A. T., Brown, M. M., & Meyer, B. A. (2016). The effects of fantastical pretend-play on the development of executive functions: An intervention study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 120–138. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.01.001>
- Thompson, T. W., Waskom, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2016). Intensive Working Memory Training Produces Functional Changes in Large-scale Frontoparietal Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(4), 575–588. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00916
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Nutley, S. B., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects

- of executive functions in preschool children. *Developmental Science*, 12(1), 106–113. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x>
- Titz, C., & Karbach, J. (2014). Working memory and executive functions: effects of training on academic achievement. *Psychological Research*, 78(6), 852–868. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0537-1>
- Töllner, T., Wang, Y., Makeig, S., Müller, H. J., Jung, T. P., & Gramann, K. (2017). Two independent frontal midline theta oscillations during conflict detection and adaptation in a Simon-type manual reaching task. *Journal of Neuroscience*, 37(9), 2504–2515. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1752-16.2017>
- Trachtenberg, J. T., Sanes, J. R., Svoboda, K., Welker, E., Knott, G. W., Chen, B. E., & Feng, G. (2002). Long-term in vivo imaging of experience-dependent synaptic plasticity in adult cortex. *Nature*, 420(6917), 788–794. <https://doi.org/10.1038/nature01273>
- 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(APR), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00525>
- Tsujimoto, T., Shimazu, H., & Isomura, Y. (2006). Direct Recording of Theta Oscillations in Primate Prefrontal and Anterior Cingulate Cortices. *Journal of Neurophysiology*, 95(5), 2987–3000. <https://doi.org/10.1152/jn.00730.2005>
- Uhlhaas, P. J., Roux, F., Rodriguez, E., Rotarska-Jagiela, A., & Singer, W. (2010). Neural synchrony and the development of cortical networks. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(2), 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.12.002>
- van de Vijver, I., Richard Ridderinkhof, K., & Cohen, M. X. (2011). Frontal oscillatory dynamics predict feedback learning and action adjustment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(12), 4106–4121. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00110
- van den Wildenberg, W. P. M., Wylie, S. A., Forstmann, B. U., Burle, B., Hasbroucq, T., & Ridderinkhof, K. R. (2010). To Head or to Heed? Beyond the Surface of Selective Action Inhibition: A Review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4(December), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00222>
- 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(1), 70–87. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.2012.02079.x>
- Van der Ven, S. H. G., Kroesbergen, E. H., Boom, J., & Leseman, P. P. M. (2012). The development of executive functions and early mathematics: A dynamic relationship. *British Journal of Educational Psychology*, 82(1), 100–119. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8279.2011.02035.x>
- Veraksa, A. N., Gavrilova, M. N., Bukhalenkova, D. A., Almazova, O., Veraksa, N. E., & Colliver, Y. (2019). Does Batman™ affect EF because he is benevolent or skilful? The effect of different pretend roles on pre-schoolers' executive functions. *Early Child Development and Care*, 0(0), 1–10. <https://doi.org/10.1080/03004430.2019.1658091>
- Vernon-Feagans, L., Willoughby, M., & Garrett-Peters, P. (2016). Predictors of behavioral regulation in kindergarten: Household chaos, parenting, and early executive functions. *Developmental*

- Psychology*, 52(3), 430–441. <https://doi.org/10.1037/dev0000087>
- Vincent, J. L., Kahn, I., Snyder, A. Z., Raichle, M. E., & Buckner, R. L. (2008). Evidence for a Frontoparietal Control System Revealed by Intrinsic Functional Connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 100(6), 3328–3342. <https://doi.org/10.1152/jn.90355.2008>
- Vygotsky, L. S. (1933). *Play and its Role in the Mental Development of the Child*. 1–18.
- Vygotsky, Lev S. (1978). Interaction between learning and development. In S. A. Books (Ed.), *Readings on the Development of Children* (Gauvain &, pp. 34–40).
- Wang, C. (2005). Responses of Human Anterior Cingulate Cortex Microdomains to Error Detection, Conflict Monitoring, Stimulus-Response Mapping, Familiarity, and Orienting. *Journal of Neuroscience*, 25(3), 604–613. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4151-04.2005>
- Wascher, E., Rasch, B., Sanger, J., Hoffmann, S., Schneider, D., Rinkenauer, G., Heuer, H., & Gutberlet, I. (2014). Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. *Biological Psychology*, 96(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.010>
- Wass, S. V. (2014). Applying cognitive training to target executive functions during early development. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 00(00), 1–17. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.882888>
- Watson, A. C., Nixon, C. L., Wilson, A., & Capage, L. (1999). Social interaction skills and theory of mind in young children. In *Developmental Psychology* (Vol. 35, Issue 2, pp. 386–391). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.35.2.386>
- Webster-Stratton, C. (1998). Preventing conduct problems in Head Start children: Strengthening parenting competencies. In *Journal of Consulting and Clinical Psychology* (Vol. 66, Issue 5, pp. 715–730). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0022-006X.66.5.715>
- Wechsler, D. (1949). *Wechsler intelligence scale for children*.
- Weisberg, D. S. (2015). Pretend play. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 6(3), 249–261. <https://doi.org/10.1002/wcs.1341>
- Wellman, H. M. (1992). The child’s theory of mind. In *The child’s theory of mind*. The MIT Press.
- Wendelken, C., Munakata, Y., Baym, C., Souza, M., & Bunge, S. A. (2012). Flexible rule use: Common neural substrates in children and adults. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(3), 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.02.001>
- Westby, C. E. (1991). Learning to talk, talking to learn: Oral-literate language differences. *Communication Skills and Classroom Success*, 334–357.
- White, R. E., & Carlson, S. M. (2016). What would Batman do? Self-distancing improves executive function in young children. *Developmental Science*, 19(3), 419–426. <https://doi.org/10.1111/desc.12314>
- 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. <https://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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008>

- Wiig, E. H., Secord, W. A., & Semel, E. (2004). *Clinical evaluation of language fundamentals (Preschool 2nd edition ed.)*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation: Harcourt Assessment. Inc.
- Wimmer, H., & Perner, J. (1983). *Beliefs about beliefs: Representation and constraining function of wrong beliefs in young children's understanding of deception*. 13, 103–128. <https://doi.org/0010-0277/83/010103-26>
- Winnicott, D. W. (1975). *Jeu et réalité*.
- Wokke, M. E., Cleeremans, A., & Ridderinkhof, K. R. (2017). Sure i'm sure: Prefrontal oscillations support metacognitive monitoring of decision making. *Journal of Neuroscience*, 37(4), 781–789. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1612-16.2016>
- Wolfe, C. D., & Bell, M. A. (2004). Working Memory and Inhibitory Control in Early Childhood: Contributions from Physiology, Temperament, and Language. *Developmental Psychobiology*, 44(1), 68–83. <https://doi.org/10.1002/dev.10152>
- Womelsdorf, T., Johnston, K., Vinck, M., & Everling, S. (2010). Theta-activity in anterior cingulate cortex predicts task rules and their adjustments following errors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(11), 5248–5253. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906194107>
- Woodcock, R. W., McGrew, K. S., Mather, N., & others. (2001). *Woodcock-Johnson III tests of achievement*.
- Woolgar, M., & Scott, S. (2005). Evidence-based management of conduct disorders. *Current Opinion in Psychiatry*, 18(4), 392–396.
- Wright, A., & Diamond, A. (2014). An effect of inhibitory load in children while keeping working memory load constant. *Frontiers in Psychology*, 5(MAR), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00213>
- Zelazo, P. D. (2004). The development of conscious control in childhood. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(1), 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.11.001>
- Zelazo, P. D., Muller, U., Frye, D., & Marcovitch, S. (2003). The Development of Executive Function in Early Childhood. *The Development of Executive Function in Early Childhood. Monographs of the Society for Research in Child Development*, 1–137.
- Zhang, H., Zhang, J., & Kornblum, S. (1999). A Parallel Distributed Processing Model of Stimulus-Stimulus and Stimulus-Response Compatibility. *Cognitive Psychology*, 38(3), 386–432. <https://doi.org/10.1006/cogp.1998.0703>
- Zhou, Q., Chen, S. H., & Main, A. (2012). Commonalities and Differences in the Research on Children's Effortful Control and Executive Function: A Call for an Integrated Model of Self-Regulation. *Child Development Perspectives*, 6(2), 112–121. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00176.x>
- Zinke, K., Einert, M., Pfennig, L., & Kliegel, M. (2012). Plasticity of Executive Control through Task Switching Training in Adolescents. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(March), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00041>

VIII. Annexes

A. OUTILS D'ÉVALUATION MENTIONNÉS

Tâches reconnues comme évaluant le contrôle cognitif global

H&F: Hear and Flower task (Coeur-fleur) ou Dots task (Davidson et al., 2006; Diamond et al., 2007)

NEPSY- II: NEuroPSYchological assessment (Korkman, 1998)

Tâches reconnues comme évaluant la flexibilité mentale

DCCS : Dimensional Card Change Sort (Frye, 1995)

WSCT : Wisconsin Card sorting Test (Grant & Berg, 1948)

TMT : Trail Making Test (Reitan, 1958)

Tâches reconnues comme évaluant la mémoire de travail

AWMA : Automated Working Memory Assessment (Alloway et al., 2009)

Dot matrix task ☒

Spatial Span Task ☒

Forward/ Backward Digit/Word Span Task

Mr Cucumber (Case, 1985)☒

SOPT : Self-Ordered Pointing Task (Petrides & Milner, 1982) ☒

Keep Track (Van der Ven et al., 2012)

N-back (Kirchner, 1958)

Tâches reconnues comme évaluant l'inhibition

Eriksen Flanker Task (Eriksen & Eriksen, 1974)

Arrow Flanker Task (Ridderinkhof & van der Molen, 1995)

Stroop (Stroop, 1935)

Tâches de Stroop adaptées :

- Day & Night (Gerstadt et al., 1994)

- Grass & Snow (Carlson & Moses, 2001)

Tâche de délai de gratification (Kochanska et al., 1996) *

Gift Wrap Task (Kochanska et al., 1996) *

Circle drawing task (Bachorowski & Newman, 1990)

Simon task (Simon, 1969)

Tâches reconnues comme évaluant l'attention exécutive

Tâche de flankers

ANT fish (Rueda, Fan, et al., 2004)

Flanker robots (Checa et al., 2014)

Tâches reconnues comme évaluant la théorie de l'esprit

Fausse croyance (Wimmer & Perner, 1983)

Relative Clause Task (Penner, 1999)

Tâches reconnues comme évaluant l'intelligence fluide

CPM : Coloured Progressive Matrices (Raven, 1947)

K-BIT : Kaufman Brief Intelligence test (Kaufman, 1990)

WPPSI-III : Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence -III (Freeman, 2013)

WJ-III : Woodcock–Johnson III (Woodcock et al., 2001)

WISC : Wechsler Intelligence Scale for Children (Wechsler, 1949)

Tâches reconnues comme évaluant l'autorégulation comportementale

HTKS : Head-Toes-Knees-Shoulders task (Ponitz et al., 2009)

Simon Says task (Strommen, 1973)

H3T : Head-To-Toes-Task (Ponitz et al., 2009)

Fish/Bear Task (Carlson et al., 2004)

Peg Tapping (Luria, 1966)

Tâches reconnues comme évaluant les compétences académiques

PPVT-III : Peabody Picture Vocabulary Test -III (Dunn et al., 1993)

EVIP : Echelle de vocabulaire en Peabody (traduction francophone du PPVT)

PIGDI : Preschool Individual Growth and Development Indicators (Priest et al., 2000)

SB-5 : Stanford-Binet 5th edition (Roid, 2003)

CELF-P2 : Clinical Evaluation of Language Fundamentals - Preschool 2nd edition (Wiig et al., 2004)

Lollipop (Chew & Morris, 1984)

Questionnaires évaluant l'autorégulation

BRIEF : Behaviour Rating Inventory of Executive Function (Gioia et al., 2010; Roy et al., 2013)

CFBRS : Cooper-Farran behavioral rating scale (Cooper & Farran, 1988)

SAR : Self-regulation assessor rating (Smith-Donald et al., 2007)

Questionnaires évaluant l'adaptation comportementale

PKBS-2 : Preschool and Kindergarten Behavior Scales - 2nd Edition (Merrell, 1994)

PSA : Profil Socio-Affectif (Dumas et al., 1997)

CBQ : Children Behavior Questionnaire (Rothbart et al., 2001)

SDQ: Strengths and Difficulties Questionnaire (Goodman, 2001)

Evaluations des compétences de jeu

Toy Phone Task (Taylor & Carlson, 1997)

Fantasy Orientation Questionnaire (Gilpin et al., 2015)

Imaginative Play Predisposition Interview (Singer & Singer, 1986)

Imaginary Companion Interview (Taylor & Carlson, 1997)

Autres

Réflexion-impulsivité : Preschool matching familiar figure task (Kagan, 1966)

Maintien actif & processus inhibiteurs : A-non-B (Piaget, 1954)

B. TABLEAU DE SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS ISSUES
D'UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LE JEU DE FAIRE
SEMBLANT ET LES APPROCHES D'ENTRAÎNEMENT
ÉCOLOGIQUES

Catégories	auteurs	Résultats synthétisés et intégrés au programme
<i>Encadrement par des adultes</i>	Baumer, Ferholt & Lecusay, 2005	La présence de l'adulte pendant le jeu de faire semblant serait particulièrement favorable au développement des compétences narratives chez l'enfant
	Landry, Pagé & Bouchard, 2013	Le soutien verbal de l'adulte au cours de la planification et de l'enrichissement du jeu symbolique améliore la capacité de l'enfant à trouver des solutions pour résoudre verbalement des conflits fictifs présentés au sein d'histoires et à prendre en compte la fausse croyance d'un personnage (théorie de l'esprit).
	Landry, Pagé & Bouchard, 2013	Le jeu collaboratif avec soutien d'un adulte favoriserait l'appropriation du langage, des structures narratives, des scripts et la théorie de l'esprit
	Bodrova & Leong, 2012	L'étayage par l'adulte lors du jeu symbolique permet une plus grande maturité du jeu et donc une implication plus importante des fonctions exécutives et des capacités d'autorégulation
<i>Jeu en groupe</i>	Ladd, 2005	Le contexte groupal des sessions de jeu représente pour l'enfant une opportunité d'exercer ses capacités sociales et cognitives avec ses pairs
	Bouchard et al., 2012	Le contexte groupal participe à la construction du répertoire de comportements de l'enfant qui permettront de favoriser ses futurs relations sociales
	Vygotsky, 1978	Loi générale du développement culturel : le développement des capacités, notamment autorégulation se fait d'abord au niveau du social, inter-régulation, puis au niveau du psychologique, intra-régulation. La pratique de la régulation en contexte groupal favorise donc le développement de l'autorégulation.
	Bodrova 2008	La constitution de groupes mixtes permet des interactions plus riches entre « experts » et « novices ». Les moins matures tirent profit de ce contexte via l'observation et l'imitation.
<i>Directivité du cadre</i>	Pelligrini, Dupuis & Smith, 2007	La diminution des éléments de cadrage implique une plus grande liberté au niveau de la direction à donner au scénario et permet aux enfant de s'exprimer plus librement sur le plan affectif
	Kraft & Berk, 1998	Les capacités d'autorégulation profitent plus grandement du jeu symbolique lorsque l'implication de l'adulte est limitée au niveau de la directivité du jeu, laissant ainsi aux enfants la possibilité de planifier et d'organiser d'avantage le jeu
	Landry, 2014	Retrait progressif de l'aide de l'adulte pour franchir les étapes de planification jusqu'à ce que l'enfant soit autonome, l'aide apportée par l'adulte variant en fonction de la maturité observée dans les différents groupes
<i>Étayage & supports à la planification</i>	Elkonin, 2005	Pour favoriser l'engagement dans le jeu et donner aux enfants les connaissances nécessaires à l'appropriation d'un rôle/scénario, il est possible d'utiliser des supports comme le dessin, les livres, les vidéos, des discussions, des visites pédagogiques. Ces supports doivent-être très descriptifs pour être efficaces.
	Garris, Ahlers, & Driskell, 2002	L'utilisation de jeu avec contenu éducatif, ludique, actif et contenant des éléments engageants augmentent la motivation à apprendre
	Weisberg et al., 2015	Eveil de la curiosité sensorielle au moyen d'un matériel coloré et attractif visuellement et de la curiosité cognitive au travers de questions suffisamment « compliquée » pour inciter les enfants à demander des mots et enrichir leur vocabulaire.
	Bodrova & Leong, 2005	Le fait d'utiliser un support visuel ou graphique lors de la planification est plus profitable aux enfants. Les enfants seront capables de se focaliser sur le rôle pendant une plus longue période et envisager des rôles ou actions plus détaillé.e.s.
	Bodrova, 2008	Le fait de disposer d'un dispositif de rappel de la planification accessible tout au long du jeu favorise la régulation des enfants quant à leur propre comportement ou ceux de leurs camarades de jeu.

	Atkins, 1981	L'insertion de cartes permet de solliciter un ensemble d'aptitudes liées à la navigation et à la planification. Dès 3 ans ½ les enfants sont capables de comprendre les cartes en 2D.
	Blades & Spencer, 1986	Dès 4 ½ ans les enfants sont capables d'utiliser une carte pour définir un itinéraire sûr.
	Sandberg et al., 2001	Les enfants de maternelles sont aptes à utiliser des cartes simples pour naviguer à travers un environnement réaliste à grande échelle, planifier et exécuter un itinéraire. Ils peuvent aussi utiliser une carte pour réorienter leur trajectoire après un obstacle
	Deak & Toney, 2013	A partir de 3 ans les enfants sont capables de comprendre le concept d'un pictogramme et de le généraliser à des catégories d'objets
	de Chantal et al., 2016	La capacité de raisonnement logique est davantage améliorée par le fait de générer des réponses alternatives qu'à la mesure de l'inhibition (DCCS). Le fait de solliciter les enfants à générer plusieurs idées alternatives lors du debriefing vise non seulement à aider à la planification mais aussi à amener l'enfant vers un fonctionnement (exécutif) plus mature.
<i>Accessoires</i>	Plumet, 2015	Les accessoires doivent être sélectionnés, et proposés de manière non abondante afin de ne pas rendre le choix trop difficile et de faciliter l'appropriation. Les accessoires mis disposition évoluent, s'enrichissent en fonction des séances.
	Bodrova & Leong, 2006	Au fur et à mesure les accessoires/jouets deviennent moins réalistes, moins structurés et plus multi-fonctionnels. Les jouets les plus réalistes peuvent être retirés. Le jeu mature se caractérise par l'utilisation d'objets substitués fortement symboliques, ne possédant pas ou peu de caractères communs avec l'objet signifié. L'expérimentateur peut au besoin montrer comment utiliser un objet de manière symbolique en augmentant progressivement le répertoire de possibilité possible d'un même objet. (Rappel de l'usage des objets symboliques en debriefing)
<i>Dimension émotionnelle</i>	Dias et al., 2016	Un intérêt porté sur la reconnaissance, la gestion et l'expression des émotions, ainsi que la résolution de conflit lors d'un programme d'intervention entraîne des bénéfices au niveau de la régulation émotionnelle et des comportements prosociaux/interpersonnels.
	Youngblade & Dunn, 1995	La complexité du jeu symbolique pratiqué par l'enfant serait positivement corrélée avec sa capacité à comprendre les émotions d'autrui
<i>Dimension fantastique</i>	Golomb & Kuersten, 1996	L'engagement dans le jeu fantastique facilite le développement des fonctions exécutives. Il sollicite davantage la flexibilité du fait du passage entre le monde réel et le monde fantastique, ainsi que la mémoire de travail pour se souvenir et mettre à jour les règles inhérentes au monde fantastique/ au monde réel.
	Pierucci, O'Brien, McInnis, Gilpin, & Barber, 2014	Les enfants de 4 à 6 ans démontrant une orientation fantastique plus développée (engagé dans une orientation cognitive fantastique, croyant aux entités féeriques) montrent également de meilleures capacités d'inhibition et de shift attentionnel.
	Carlson, White, & Davis-Unger, 2014	Il existe une corrélation positive chez les jeunes enfants entre le niveau exécutif (contrôle inhibiteur, shift attentionnel et mémoire de travail) et i) la compréhension de la dichotomie monde réel / monde fantastique, ii) la capacité de réaliser des actions symboliques.
	Weisberg et al., 2015	Le fait d'incorporer des éléments fantastiques engendrerait des bénéfices au niveau de l'apprentissage du vocabulaire
<i>Contenu des scénarios</i>	Umek et al. 1999	Les auteurs ont déterminé au travers d'une étude comparative que le jeu symbolique d'enfants âgés de 4 à 6 ans basé sur un scénario médical était riche en termes d'interactions, communication verbale et bénéficiait d'un haut degré de symbolisme induit par les objets. Dans un autre scénario évalué 'le chien perdu' induisait un jeu plus riche quant aux actions et situations.

	Umek & Musek, 2001	mettent en avant le fait que chez les jeunes enfants il est nécessaire d'avoir à disposition du matériel réaliste pour s'immerger dans le jeu symbolique, alors que des enfants plus âgés ont besoin à la fois de matériel réaliste mais aussi d'objets symboliques, ces derniers permettant un effort de flexibilité et de faire semblant.
	Bodrova & Leong, 2006	Un jeu mature se caractérise par la capacité de l'enfant à respecter les règles inhérentes au scénario (ex : école, hôpital) et au personnages incarnés (ex : professeur, médecin). En complexifiant progressivement les scénarios (moins familiers, plus transversaux,...) on oblige les enfants à respecter de nouvelles règles qui jusque là n'étaient pas associées à certains scénarios/personnages.
	Bodrova & Leong, 2012	Avant le jeu, l'expérimentateur plus expérimenté apporte des précisions, des connaissances sur de possibles rôles/actions et propose éventuellement des moments de réflexion en cas de conflits ou problème à résoudre.
	Bodrova & Leong, 2012	Durant le jeu, l'expérimentateur peut incarner un rôle momentanément pour introduire un élément, enrichir le scénario, préciser un objet.
<i>Aspects divers</i>	Diamond, 2017	Pour qu'un entraînement puisse apporter des bénéfices il est important de maintenir un challenge tout au long de la période de stimulation afin que l'enfant puisse continuellement tirer profit de son expérience de jeu.
	Deneault et al., 2014	La ritualisation en début et fin de session participe à sécuriser l'enfant et à concrétiser l'espace temporel dévolu à l'activité de jeu.
	Bodrova & Leong, 2006	Un jeu mature se caractérise par la capacité de l'enfant à prendre et à garder un rôle en réalisant des actions, parlant et en ayant des interactions cohérentes pour son personnage. Des rôles plus définis, plus orientés entraîneront des efforts plus importants pour garder cette cohérence entre rôle / action / interaction.

C. MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRES À L'ARTICLE ADAM ET AL., 2020

- i) Appendix A : Modèles GLMer
- ii) Appendix B : Modèles GLM
- iii) Appendix C : Analyses comportementales sur échantillon réduit

Appendix A

		GLMer															
		Response time*				Accuracy				Response time**				MFT power			
		β	CI	t-value	p-value	β	CI	t-value	p-value	β	CI	t-value	p-value	β	CI	t-value	p-value
Fixed effects	Intercept	7.063	(7.017, 7.109)	299.610	<.0001	2.640	(2.279, 3.001)	14.337	<.0001	7.052	(6.993, 7.112)	233.346	<.0001	2.031	(1.637, 2.425)	10.113	<.0001
	Group	-0.333	(-0.405, -0.260)	-9.023	<.0001	0.785	(0.228, 1.341)	2.764	0.006	-0.335	(-0.421, -0.249)	-7.625	<.0001	0.584	(0.015, 1.153)	2.011	0.045
	cl	0.114	(0.074, 0.154)	5.575	<.0001	-0.644	(-0.945, -0.344)	-4.200	<.0001	0.113	(0.060, 0.166)	4.147	<.0001	0.562	(0.111, 1.012)	2.441	0.015
	iC	0.118	(0.084, 0.152)	6.831	<.0001	-0.906	(-1.185, -0.626)	-6.353	<.0001	0.109	(0.065, 0.152)	4.920	<.0001	0.554	(0.103, 1.005)	2.408	0.017
	il	0.066	(0.023, 0.108)	3.009	0.003	-0.095	(-0.415, 0.226)	-0.577	0.564	0.073	(0.018, 0.129)	2.580	0.010	0.321	(-0.129, 0.772)	1.397	0.163
	Group : cl	-0.037	(-0.099, 0.025)	-1.170	0.242	-0.130	(-0.591, 0.332)	-0.551	0.582	-0.033	(-0.111, 0.044)	-0.846	0.398	-0.783	(-1.435, -0.131)	-2.355	0.019
	Group : iC	-0.006	(-0.058, 0.047)	-0.212	0.833	-0.432	(-0.853, -0.011)	-2.012	0.045	0.003	(-0.060, 0.065)	0.082	0.935	-0.367	(-1.019, 0.284)	-1.105	0.270
	Group : il	-0.065	(-0.132, 0.001)	-1.936	0.053	0.332	(-0.166, 0.830)	1.306	0.192	-0.067	(-0.147, 0.013)	-1.635	0.103	-0.496	(-1.148, 0.155)	-1.493	0.136
	MFT power	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002	(-0.019, 0.022)	0.154	0.878	-	-	-	-
	MFT power : cl	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002	(-0.026, 0.030)	0.121	0.904	-	-	-	-
	MFT power : iC	-	-	-	-	-	-	-	-	0.012	(-0.017, 0.040)	0.819	0.413	-	-	-	-
	MFT power : il	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.027	(-0.056, 0.002)	-1.821	0.069	-	-	-	-
	MFT power : Group	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002	(-0.027, 0.031)	0.112	0.911	-	-	-	-
	MFT power : Group : cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.017	(-0.057, 0.022)	-0.846	0.398	-	-	-	-
	MFT power : Group : iC	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.018	(-0.059, 0.022)	-0.901	0.368	-	-	-	-
	MFT power : Group : il	-	-	-	-	-	-	-	-	0.019	(-0.021, 0.060)	0.939	0.348	-	-	-	-

		Variance	SD	Variance	SD	Variance	SD	Variance	SD
Random effects	Intercept	0,006	0,08	1,17	1,08	0,007	0,08	0,5	0,71
	cl	0,006	0,089	0,24	0,49	0,007	0,09	-	-
	iC	0,004	0,07	0,14	0,38	0,004	0,07	-	-
	il	0,007	0,08	0,13	0,36	0,008	0,09	-	-
	Residuals	0,06	0,24	-	-	0,06	0,23	0,95	0,98

		98	98	69	69
Parameters	N subject	98	98	69	69
	N obs	9395	11676	5821	276
	<i>K-children cC</i>	1262	1566	693	-
	<i>K-children cl</i>	1356	1818	763	-
	<i>K-children iC</i>	1324	1822	769	-
	<i>K-children il</i>	1246	1556	687	-
	<i>P-children cC</i>	1005	1159	682	-
	<i>P-children cl</i>	1083	1288	753	-
	<i>P-children iC</i>	1074	1305	737	-
	<i>P-children il</i>	1045	1162	737	-
	Log Likelihood	-64873.310	-3721.3	-40058.69	-425.774
	AIC	129920.400	7478.7	80171.38	871.548
	Model's family	Gamma	Binomial	Gamma	Gaussian (lmer)
Link	log	logit	log	identity	

Diagnostic tables for models run via lme4 package on R with description of fixed and random effects as well as parameters of the models

* Response time ~Group * interference condition

** Response time ~Group * Interference condition * MFT Power

Appendix B

		GLM							
		Response time**				Latency			
		β	CI	t-value	p-value	β	CI	t-value	p-value
Fixed effects	Intercept	6.999	(6.902, 7.096)	141.449	<.0001	6.862	(6.717, 7.008)	92.453	<.0001
	Group	-0.267	(-0.398, -0.136)	-4.003	0.0002	-0,487	(-0,697, -0,277)	-4.538	<.0001
	cl	-	-	-	-	-	-	-	-
	iC	-	-	-	-	-	-	-	-
	il	-	-	-	-	-	-	-	-
	Group : cl	-	-	-	-	-	-	-	-
	Group : iC	-	-	-	-	-	-	-	-
	Group : il	-	-	-	-	-	-	-	-
	Latency	0.0002	(0.0001, 0.0002)	3.125	0.003	-	-	-	-
	Grp : Latency	-0.0001	(-0.0002, 0.0001)	-0.925	0.359	-	-	-	-

Parameters	N subject	69	69
	N obs	69	69
	Log Likelihood	-427.057	-497.879
	AIC	862.114	999.757
	Residual deviance	0.838 (df = 65)	15.240 (df = 67)
	Null Deviance	3.302 (df = 68)	19.257 (df = 68)
	Model's family	Gamma	Gamma
	Link	log	log

Diagnostic tables for GLM models runned on R with description of fixed and parameters of the models

** Response time ~ Group * Latency

Appendix C

Supplemental table Post-hoc comparisons for response times and accuracy between interference conditions in Preschool and School children independently for the 69 children involved in EEG analysis. Mean differences are reported as delta values with their corresponding standard errors. The associated z- and p-values are also reported (significant differences are indicated by grey cells).

N = 69				
contrasts	RT (ms)		Accuracy (%)	
	Preschool children	School children	Preschool children	School children
cC / iC	(z=-5,549, p<.0001) Δ = -151,62 ±27ms	(z=-4.899, p<.0001) Δ = -99.63 ± 20ms	(z=4.650, p<.0001) Δ = 8.55 ±1.84%	(z=4.658, p<.0001) Δ = 7.07 ±1.52%
cC / cI	(z=-4,481, p<.0001) Δ = -147,54 ±33ms	(z=-2.803, p=.0076) Δ = -68.12 ± 24ms	(z=3.441, p=.0009) Δ = 5.99 ±1.74%	(z=2.999, p=.0041) Δ = 3.59 ±1.19
cC / iI	(z=-2,487, p=.0193) Δ = -84,11 ±34ms	(z=-0.050, p=.9598) Δ = -1.24 ± 25ms	(z=0.212, p=.8319) Δ = 0.29 ±1.38%	(z=-1.285, p=.1988) Δ = -0.95 ± 0.74%
iC / cI	(z=0,175, p=.8613) Δ = 4,08 ± 23ms	(z=1.799, p=.0865) Δ = 30.51 ±17ms	(z=-1.376, p=.2026) Δ = -2.55 ± 1.85%	(z=-2.305, p=.0254) Δ = -3.481 ±1.51%
iC / iI	(z=2.197, p=.034) Δ = 67.52 ±31ms	(z=4.374, p<.0001) Δ = 97.39 ± 22ms	(z=-4.565, p<.0001) Δ = -8.26 ±1.81%	(z=-5.176, p<.0001) Δ = -8.02 ±1.55%
cI / iI	(z=2.954, p=.006) Δ = 63.43 ± 21ms	(z=4.532, p<.0001) Δ = 66.88 ± 15ms	(z=-3.660, p=.0005) Δ = -5.70 ± 1.56%	(z=-4.071, p=.0001) Δ = -4.54 ±1.12%