



**HAL**  
open science

# Entraînement au contrôle inhibiteur et méditation de pleine conscience : une approche multi-niveaux et développementale

Gabriela Rezende Freire Ribeiro

► **To cite this version:**

Gabriela Rezende Freire Ribeiro. Entraînement au contrôle inhibiteur et méditation de pleine conscience : une approche multi-niveaux et développementale. Psychologie. Université Paris Cité, 2022. Français. NNT : 2022UNIP7302 . tel-04496182

**HAL Id: tel-04496182**

**<https://theses.hal.science/tel-04496182v1>**

Submitted on 8 Mar 2024

**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.



LaPsyDÉ



Université Paris Cité  
Ecole Doctorale 261 - Cognition, Comportements, Conduites Humaines  
Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'Enfant  
(UMR 8240)

---

# Entraînement au contrôle inhibiteur et méditation de pleine conscience : une approche multi-niveaux et développementale

---

Gabriela REZENDE FREIRE RIBEIRO

Thèse de doctorat de Psychologie, Mention Neurosciences cognitives

Dirigée par le Pr. Arnaud CACHIA

Présentée et soutenue publiquement le 15 décembre 2022

Devant un jury composé de :

Pr. Arnaud CACHIA	Université Paris Cité	Directeur de thèse
Pr. Marie-Hélène GROSBAS	Université Aix-Marseille	Rapporteur
Pr. Rebecca SHANKLAND	Université Lumière Lyon 2	Rapporteur
Pr. Cédric BOUQUET	Université de Poitiers	Examineur
Dr. Pauline FAVRE	Neurospin - CEA Paris-Saclay	Examineur
Pr. Arnaud ROY	Université d'Angers	Examineur

## LISTE DES ÉLÉMENTS SOUS DROITS

Liste de **tous les éléments retirés** de la version complète de la thèse  
faute d'en détenir les droits

### Figures

Légende de l'image	N° de l'image	Page(s) dans la thèse
<i>Sous-parties du gyrus frontal inférieur</i>	Figure 6	46
<i>L'insula</i>	Figure 7	49
<i>Les ganglions de la base et les structures environnantes</i>	Figure 8	51

# Remerciements

---

Mes premiers remerciements sont adressés aux membres du jury, Marie-Hélène Grosbras, Pauline Favre, Rebecca Shankland, Arnaud Roy et Cédric Bouquet, qui ont accepté d'apporter leur expertise et de consacrer leur temps sur ce travail de recherche. Je les remercie pour me faire l'honneur d'être présents lors de ma soutenance de thèse.

Je remercie Grégoire Borst pour m'avoir accueillie au sein du LaPsyDÉ pendant mon doctorat. Ton soutien a été essentiel pour que ce travail se déroule dans les meilleures conditions. Je tiens également à remercier Olivier Houdé pour l'invitation à la cérémonie de remise de l'épée d'Académicien sous la Coupole. Cela a été un moment de grande fierté pour la psychologie du développement.

Je remercie Arnaud, mon directeur de thèse, pour son encadrement si humain et bienveillant. Merci de m'avoir accompagnée pendant ces années tellement atypiques et déterminantes dans ma vie. Si tous les obstacles – et il y en a eu plusieurs – ont été dépassés pour l'accomplissement de ce grand projet de doctorat, c'est en grande partie grâce à toi. Je te remercie pour ta rigueur, ta souplesse et ta pédagogie, pour les échanges professionnels ou non. Apprendre à tes côtés a été ma première motivation pour réaliser cette thèse il y a quatre ans, et quatre ans et quatre cents sillons après, je me réjouis autant d'avoir pris cette décision.

Je tiens à remercier toute l'équipe de Sainte-Anne, en particulier Catherine Oppenheim pour avoir accueilli le projet APEX avec toute son énergie. Je remercie également Stéphanie Lyon pour sa patience et la formation IRM qui m'a permis de réaliser les acquisitions d'imagerie de manière autonome. Merci à Sylvain Charron pour sa résilience face à mon ordinateur Windows. Je remercie aussi Qin He et Boris Chaumette pour tous les éclaircissements sur les analyses génétiques.

Un merci spécial à l'équipe du CRC, qui m'a toujours soutenue et avec qui j'ai pu partager des moments inoubliables. Ça a été un vrai plaisir de travailler avec vous. Merci à Macarena Cuenca-Maia pour sa gentillesse, sa réactivité remarquable, les alfajores, le Ninho, les invitations aux repas/fêtes du CRC et plus ! Merci également à Antonia Goncalves pour toute l'énergie déployée dans mon projet. Merci infiniment à Narjes Bendjemaa pour m'avoir aidée dans le travail colossal de numérisation de tous les dossiers du projet.

Je remercie également Anna Fayolle pour avoir été une force de la nature à nos côtés. Merci pour m'avoir rassurée face à tous les obstacles que la pandémie nous a imposés. Merci pour la complicité et pour la qualité irréprochable de ton travail. Tu as été essentielle pour que les passations se déroulent dans la bonne humeur. Merci aussi pour les moments passés autour d'un verre (ou d'un chocolat chaud), notamment ceux avec le popcorn au parmesan !

Un grand merci à tous les participants d'APEX et leurs familles, notamment les adolescents du groupe méditation. Je remercie aussi les proviseurs des lycées et les enseignants qui nous ont permis un recrutement efficace.

Un grand merci à tous les membres du LaPsyDÉ. Je remercie Lorna, qui m'a supervisée et orientée pour les analyses statistiques. Merci pour tous les efforts et l'immense qualité de son travail. Merci à Julie Vidal, pour sa gentillesse et son écoute bienveillante ; à Emilie Salvia, pour sa pédagogie innée et les échanges toujours enrichissants sur de nombreux sujets, de chats aux analyses en IRM fonctionnelle ; à Arnaud Viarouge pour tous les « bom dia » et les conversations très appétissantes sur la cuisine brésilienne. Merci à Mathieu Cassotti et Wim de Neys pour leur bonne humeur. Je remercie Nicolas Poirel pour son amabilité et pour les cours en L2 qui m'ont inspirée à mieux connaître la psychologie du développement ; à Irene Altarelli pour son humanité ; à Ania Aïte pour sa sympathie ; à Alex de Carvalho pour les suggestions scientifiques. Merci aussi à ceux que j'ai moins eu l'occasion de côtoyer, mais avec qui c'était un plaisir d'échanger : André Knops, Elise Klein et Teresa Luculano.

Un merci particulier à Claire Pruvot qui a toujours répondu à mes (très) nombreuses questions administratives (ou non). Merci également à Noorrah Bahadoor pour sa gentillesse et sa douceur hors pair. Cela a été un grand plaisir de te rencontrer et de partager tant d'histoires émouvantes. Sans oublier Lucie Halpern, avec qui j'ai pu avoir des échanges passionnants sur l'Argentine.

Je remercie chaleureusement toutes les doctorantes avec qui j'ai vécu de moments intenses ces dernières années. Un merci spécial à Emma, avec qui j'ai commencé l'aventure du doctorat et ai partagé la plus grande aventure de toutes, celle de la maternité. Merci pour tes conseils, ta tendresse et les longues conversations au téléphone. Merci aussi à Alexander pour les déjeuners estivaux sur la terrasse du Collège de France.

Merci à Iris d'avoir été là durant les moments ensoleillés et nuageux, ainsi que lors des passations parfois très tardives à Sainte-Anne. Ça a été un vrai plaisir de supporter le froid (et les éventuelles araignées) du CIREN avec toi. Je te remercie pour ton écoute, ton soutien et ta sincérité. Merci à Chiara pour toute l'amitié, l'énergie positive et les tiramisus qui ont revigoré mes journées. Tu as été une présence spéciale sur qui compter. Je remercie également Esther pour m'avoir toujours offert son aide à tout type de situation, allant du code à la crèche. Je te suis profondément reconnaissante pour cela. Un grand merci aussi à Sixtine, avec qui j'ai plongé dans le projet APEX. Ton aide a été plus que capitale pour que ce projet puisse aboutir. Notre formation IRM, les relais entre la batterie, l'imagerie et les prélèvements génétiques sont aujourd'hui des souvenirs parfumés dont je suis fière. Je remercie aussi Sabrina, la conceptrice du 21, pour toute la complicité et l'empathie.

Un grand merci aux « nouvelles » avec qui j'ai partagé des rires, du thé et des histoires d'accouchement : Nydia et Katerina. Merci à Julia pour cette énergie douce et intense, visionnaire et posée... reste comme ça ! Je remercie Elora pour sa douceur bienveillante. Merci à Gaëlle pour la joie, à Marine pour la bonne humeur, à Nina pour l'exemple d'élégance et à Barbara pour tous les moments agréables à Boulogne et à la Sorbonne. Un merci spécial à Mélanie pour être un modèle d'organisation et de gestion, une vraie source d'inspiration et d'énergie. Merci aussi à Mayara, qui a été un souffle d'été carioca dans l'hiver parisien.

Je remercie également les anciens, Manali et Marie pour m'avoir accueillie. Merci aussi à Joy pour toutes les fois où tu as installé l'imprimante dans mon ordinateur capricieux. Merci à Margot pour sa gentillesse, pour avoir toujours été un modèle hors-concours pour moi. Et aussi Matthieu, merci pour les discussions tardives sur les statistiques, l'IRM et Saint-Seiya. Un jour je trouverai la motivation pour regarder la parodie (ou non)...

Je n'oublie pas les postdocs (anciens et nouveaux): merci à Ilse, Prany et Letícia pour les moments joyeux.

Je tiens à remercier Dorine Vergilino-Perez de m'avoir accueillie dans son laboratoire et de m'avoir permis de finir ma thèse dans les meilleures conditions. Je ne serais certainement pas là si je n'avais pas connu le monde de la recherche auprès de vous et de votre équipe durant mes années de licence.

Un merci chaleureux à Marine Moyon dont le soutien a été présent tout au long de ma thèse. Tu es beaucoup plus que mon unique fréquentation française qui connaisse Allan Kardec. Tu es une amie spéciale que la fin de la thèse n'éloignera pas.

Un merci à Flávia, Maria et Hindou, pour tous les encouragements lors de la thèse et l'entraide précieuse – et plus que nécessaire – entre mamans.

Merci aussi à Viktoriya pour avoir partagé cet objectif doctoral avec moi dès les premiers jours de la licence. Merci pour les messages touchants que je garde en mémoire.

Un énorme merci à Basma, pour... tout ! Pour son écoute attentive, ses mots doux, ses rappels à l'ordre, ses corrections, sa confiance, ses petites grandes attentions... Tu as toujours été là et je ne l'oublierai jamais. Je suis vraiment très chanceuse de t'avoir dans ma vie.

Merci aussi à Farida pour l'amie que tu es. Merci d'être toujours venue à mon secours, que ce soit à Boulogne, à la Sorbonne, à la maison, dans la réalité ou en rêve. La sensation de pouvoir compter sur ton amitié me réchauffe le cœur. Notre « boîte à idées » doit être pleine depuis tous ces mois de conversation en suspens !

Je remercie Gustavo pour tous les moments à parler du passé, du présent et du futur. C'est drôle de penser que ça fait plus de 30 ans que l'on se connaît... C'est drôle de penser que nos prénoms figuraient ensemble sur le petit livre de fin du CP (alfabetização) et que tu figures aussi sur ma thèse de doctorat !

Je tiens à remercier mamie Mina, qui a toujours cru en moi et a rendu possible la poursuite de mes grands projets. Merci aussi à Josette, pour avoir été la meilleure arrière-grand-mère d'adoption qu'on aurait pu souhaiter. Merci à Baye pour toute sa générosité qui a été tellement précieuse au cours de ces années de travail acharné.

Merci à la famille Odorico pour toute leur gentillesse et leur bienveillance !

Je remercie mon cher Voyou pour avoir été à mes côtés tout au long de mes nuits, du début de la licence au début du doctorat. Tu as été un vrai expert en ronronthérapie. Le ciel est ravi de t'avoir parmi ses stars. Merci aussi à mon petit roux atomique qui a guéri un cœur endeuillé et, comme son prédécesseur, a été mon compagnon dans les nuits à rédiger.

Gostaria de agradecer à minha família, que contribuiu de forma ímpar para que eu chegasse aqui, mesmo estando longe. Obrigada à minha mãe por me ensinar desde muito cedo que não há nada que eu não possa alcançar. Você é o meu exemplo de força e superação. Obrigada, papai, por ser o professor do qual tanto me orgulho e no qual sempre me espelhei. Obrigada, Léo e Danilo, por serem o melhor irmão mais velho e melhor irmão caçula com os quais a vida poderia me presentear. Obrigada à Néa por cuidar tão bem de mim. Eu tenho uma sorte imensa de tê-los.

Obrigada, Wilminha, por ser quem você é. Obrigada pela palavra sábia no momento certo. Esta tese não seria a mesma sem todos os meus retiros em Saint-Didier-de-Formans!

Obrigada aos meus amigos de longa data com quem compartilhei minhas aspirações e frustrações e que contribuíram, cada um à sua maneira, para consolidar meus projetos mais ambiciosos. Obrigada, Chris, Féca, Nut, Ceci, Romerinho e Rafa Leite.

Obrigada à minha querida Ceres, meu amor, meu maior e mais belo presente na vida. Você é a Luz que ilumina meus caminhos e me inspira a ir além. Espero que esta tese também a inspire, um dia, a ir além. As vitórias das batalhas mais difíceis são as que mais nos orgulham.

E obrigada a Ele, a quem jamais cansarei de agradecer por tudo.

Pour finir, merci à Victor, à qui je dédie cette thèse. Tu es le pilier de cette réussite. Cette thèse est aussi la tienne. Merci pour ces longues années à rêver avec moi... Merci pour rendre réels mes plus beaux rêves.



*...E Ihe disseram que suas pernas seriam curtas demais para escalar tais montanhas. Aí hesitou.*

*E então se lembrou de que tinha asas.*

# Table de matières

---

<b>Liste des principales abréviations.....</b>	<b>1</b>
<b>Avant-propos .....</b>	<b>2</b>
<b>Publications .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Le contrôle inhibiteur, une composante exécutive clef .....</b>	<b>8</b>
1.1. Les fonctions exécutives.....	8
1.1.1. Définition.....	8
1.1.2. Modèle des fonctions exécutives .....	9
1.1.2.1. La mémoire de travail (MdT) .....	11
1.1.2.2. Le contrôle inhibiteur.....	12
1.1.2.3. La flexibilité mentale .....	13
1.1.3. Spécificité et complémentarité des fonctions exécutives.....	14
1.2. Taxonomies du contrôle inhibiteur.....	16
1.2.1. Taxonomie d'Harnishfeger (1995) .....	16
1.2.2. Taxonomie de Dempster et Corkill (1999) .....	18
1.2.3. Taxonomie de Friedman & Miyake (2004).....	18
1.2.4. Taxonomie de Diamond (2013) .....	19
1.2.5. Taxonomie de Nigg (2000) .....	20
1.2.6. Taxonomie de Zelazo et Müller (2002) .....	21
1.3. Reconfigurations post-piagésiennes : la théorie des systèmes .....	22
1.4. Le développement du contrôle inhibiteur.....	23
1.4.1. Contrôle inhibiteur actif et proactif .....	24
1.4.2. Contrôle inhibiteur froid et chaud .....	25
1.5. L'entraînement du contrôle inhibiteur.....	29
1.5.1. Enfance.....	30
1.5.2. Adolescence.....	33
1.5.3. Effets de transfert .....	37
1.6. Caractérisation multi-niveau du contrôle inhibiteur.....	40
1.6.1. Niveau cérébral.....	40
1.6.1.1. Le cortex cingulaire antérieur (CCA) .....	43
1.6.1.2. Le gyrus frontal inférieur (GFI).....	46
1.6.1.3. Les structures sous-corticales .....	48
1.6.1.3.1. Insula .....	

1.6.1.3.2.	Ganglions de la base et structures environnantes .....	50
1.6.1.3.3.	Amygdale .....	52
1.6.2.	Aspects neurodéveloppementaux .....	53
1.6.2.1.	Contraintes précoces, marqueurs qualitatifs – trait .....	53
1.6.2.2.	Contraintes tardives, marqueurs quantitatifs – état .....	57
1.6.2.3.	Aspects d'apprentissage .....	60
1.6.3.	Aspects génétiques .....	63
1.6.3.1.	Le système dopaminergique .....	64
1.6.3.1.1.	COMT .....	64
1.6.3.1.2.	DAT .....	66
1.6.3.1.3.	DRD1, DRD2 .....	67
1.6.3.1.4.	BDNF .....	69
1.6.4.	Aspects physiologiques .....	70
1.6.4.1.	Glucose .....	71
1.6.4.2.	Chronobiologie .....	74
1.7.	Conclusion .....	77
<b>2.</b>	<b>La méditation de pleine conscience .....</b>	<b>79</b>
2.1.	La méditation .....	79
2.2.	Contexte historique .....	79
2.3.	La méditation de pleine conscience .....	82
2.3.1.	La méditation de pleine conscience : caractérisation trait & état .....	83
2.3.2.	Les principales interventions basées sur la pleine conscience .....	86
2.3.2.1.	MBSR (Mindfulness-Based Stress Reduction) .....	86
2.3.2.2.	MAPs (Mindfulness Awareness Practices) .....	89
2.3.2.3.	IBMT (Integrative Body-Mind Training) .....	91
2.3.3.	Les programmes basés sur la pleine conscience ont-ils des effets délétères ? .....	92
2.4.	Le contrôle inhibiteur et les mécanismes cognitifs dans la pleine conscience .....	94
2.4.1.	Régulation attentionnelle .....	96
2.4.2.	La conscience de soi .....	98
2.4.2.1.	La conscience du corps .....	98
2.4.2.2.	Le changement de perspective sur le soi .....	99
2.4.3.	La régulation émotionnelle .....	100
2.5.	Les mécanismes cognitifs dans la pleine conscience et les bases cérébrales .....	103
2.5.1.	Bases cérébrales de la régulation attentionnelle .....	104
2.5.2.	Bases cérébrales de la conscience corporelle .....	107

2.5.3.	Bases cérébrales du changement de la perspective sur le soi .....	109
2.5.4.	Bases cérébrales de la régulation émotionnelle.....	110
2.6.	Effets neurocognitifs de la pleine conscience durant le développement .....	112
2.6.1.	Chez l'enfant.....	113
2.6.2.	Chez l'adolescent .....	115
2.7.	Conclusion .....	117
<b>3.</b>	<b>Objectifs et contributions de la thèse.....</b>	<b>118</b>
3.1.	Objectifs.....	118
3.2.	Contribution.....	120
3.3.	Le projet APEX.....	121
<b>4.</b>	<b>Méthode APEX .....</b>	<b>125</b>
4.1.	Recrutement.....	125
4.1.1.	Chez l'enfant.....	125
4.1.2.	Chez l'adolescent .....	126
4.1.3.	Critères d'inclusion et d'exclusion .....	129
4.2.	Design expérimental .....	131
4.2.1.	Visite d'inclusion .....	132
4.2.2.	Visite d'inclusion dans APEX Ado 2 .....	133
4.2.3.	L'entraînement cognitif.....	134
4.2.3.1.	Méditation de Pleine Conscience (PC) .....	136
4.2.3.2.	Entraînement cognitif au contrôle inhibiteur (CI) .....	138
4.2.3.3.	Contrôle Actif (CA) .....	140
4.2.4.	Imagerie pré et post-entraînement .....	141
4.2.4.1.	Déroulement sur site.....	142
4.2.4.1.1.	Chez l'enfant (Caen) .....	142
4.2.4.1.2.	Chez l'adolescent (Paris).....	146
4.2.4.2.	Paramètres d'acquisitions en IRM Anatomique .....	150
4.2.5.	Evaluations cognitives pré et post-entraînement .....	150
4.2.5.1.	Stroop Cognitif .....	151
4.2.5.2.	Stroop Emotionnel .....	153
4.2.5.3.	Attention Network Task .....	154
4.2.5.4.	Stop Signal .....	156
4.2.5.5.	Prétraitement des données .....	157

4.2.6.	Questionnaires démographiques et socio-économiques .....	158
4.2.7.	Questionnaires sur la méditation de pleine conscience .....	159
4.2.8.	Evaluations de la glycémie .....	160
4.2.9.	Analyses génétiques .....	160
4.2.10.	Journal de bord.....	161
4.3.	Exclusion post-entraînement.....	161
<b>Etudes expérimentales.....</b>		<b>162</b>
<b>Etude 1 : Effets sur le contrôle inhibiteur froid et chaud de la méditation de pleine conscience et de l'entraînement cognitif chez les enfants et les adolescents .....</b>		<b>164</b>
1.1.	Introduction .....	164
1.2.	Méthode .....	167
1.2.1.	Participants.....	167
1.2.2.	Interventions .....	169
1.2.3.	Évaluation du CI .....	169
1.2.4.	Analyses statistiques.....	170
1.3.	Résultats .....	170
1.4.	Discussion .....	174
<b>Etude 2 : L'influence du taux de glycémie sanguine et de l'indice de masse corporelle sur l'efficacité du contrôle inhibiteur chez les adolescents avant et après entraînement .....</b>		<b>181</b>
2.1.	Introduction .....	181
2.2.	Méthode .....	186
2.2.1.	Participants.....	186
2.2.2.	Interventions .....	186
2.2.3.	Evaluation du CI .....	186
2.2.4.	Evaluation physiologique .....	187
2.2.5.	Analyses statistiques.....	190
2.3.	Résultats .....	190
2.4.	Discussion .....	197
<b>Etude 3 : Les motifs sulcaux du cortex cingulaire antérieur contribuent à l'efficacité et à l'apprentissage du CI chez les enfants : une étude longitudinale et développementale .....</b>		<b>205</b>
3.1.	Introduction .....	205
3.2.	Méthode .....	208
3.2.1.	Participants .....	208
3.2.2.	Acquisitions IRM.....	208
3.2.3.	Sessions de pré- et post-intervention.....	208

3.2.4. Segmentation des sillons .....	209
3.2.5. Classification du CCA .....	209
3.2.6. Interventions .....	211
3.2.7. Evaluation comportementale.....	211
3.2.8. Analyses statistiques.....	213
3.3. Résultats .....	213
3.4. Discussion .....	219
3.5. Conclusion.....	225
<b>Discussion générale.....</b>	<b>227</b>
1.1.Synthèse des résultats.....	227
1.2. L'entraînement du CI chez l'enfant et l'adolescent .....	229
1.2.1. La méditation de pleine conscience est-elle efficace sur le CI ? .....	229
1.2.2. L'effet de compensation et l'effet plafond .....	230
1.2.3. Le rôle de la motivation .....	232
1.3.Critiques et améliorations des entraînements .....	233
1.3.1. Méditation guidée sur tablette .....	233
1.3.2. Tâches d'entraînement alternatives .....	235
1.3.3. Neurofeedback et biofeedback .....	237
1.3.4. Posttest différé et effets de transfert .....	238
1.4.Efficience du CI chez l'enfant et l'adolescent .....	240
1.4.1. La précision, la pureté et l'adaptabilité des tâches .....	240
1.4.2. Les analyses statistiques .....	242
1.5.Perspectives.....	244
1.5.1. Sur le projet APEX .....	244
1.5.1.1. Echelles de pleine conscience.....	244
1.5.1.2. La place de l'environnement .....	245
1.5.1.3. Journaux de bord .....	246
1.5.1.4. L'analyse génétique.....	247
1.5.1.5. L'imagerie cérébrale.....	248
1.5.2. Vers l'éducation .....	250
1.5.2.1. Attention aux effets indésirables .....	250
1.5.2.2. Réflexions éthiques et épistémologiques.....	251
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>253</b>

<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>255</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>324</b>
Annexe 1.....	324
Annexe 2.....	325
Annexe 3.....	326
Annexe 4.....	328
Annexe 5.....	329
Annexe 6.....	372
Annexe 7.....	390
<b>Résumé</b> .....	<b>403</b>

# Liste des principales abréviations

---

APEX : Projet APprentissages EXécutifs

ANT : *Attentional Network Task* – Tâche des réseaux attentionnels

BOLD : Blood Oxygen Level Dependent

BRIEF : Behavior Rating Inventory of Executive Function

CCA : Cortex Cingulaire Antérieur

CI : Contrôle Inhibiteur

CPF : Cortex préfrontal

CPP : Comité de Protection des Personnes

FE : Fonctions Exécutives

GFI : Gyrus Frontal Inférieur

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

IRMa : Imagerie par Résonance Magnétique anatomique

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

MdT : Mémoire de Travail

SPC : Sillon ParaCingulaire



# Avant-propos

---

## Echanges avec des adolescents ayant effectué notre étude sur la méditation :

*« Finalement, la méditation m'a aidé pour les oraux du BAC. Je me suis concentré sur ma respiration pour ne pas paniquer. Puis j'ai paniqué car j'ai eu peur de m'endormir comme durant les séances. »*

*« Mes parents parlent trop fort et me dérangent pendant les séances. Je dois trouver une solution. Est-ce que vous pouvez les inscrire à votre projet aussi ? »*

*« Il y a eu une incursion fratricide dans ma chambre au cours de la séance. J'ai été déconcentré le temps de repousser l'ennemi. »*

*« C'est vraiment génial d'être en Auvergne pour méditer. C'est extrêmement calme, limite angoissant. Je ne méditerai plus quand j'y serai. »*

A la lecture de ces quelques échanges, nous entrevoyons les aléas de l'entraînement cognitif, notamment la pratique de la méditation de pleine conscience, chez les adolescents. Or, l'enfance et l'adolescence sont précisément des périodes propices pour la réalisation de ces entraînements car elles constituent des fenêtres sensibles du développement (Diamond, 2012; Knoll et al., 2016). Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés au contrôle inhibiteur (CI), une fonction exécutive qui joue un rôle clef dans la réussite académique, le succès professionnel et la santé mentale (e.g. Moffitt et al., 2011). Il existe actuellement de nombreuses interventions à même d'entraîner le CI. Parmi ces interventions, la méditation de pleine conscience sollicite les capacités d'inhibition afin de garder une attention aux expériences du moment présent, dépourvue de jugement (e.g. Takacs & Kassai, 2019), soutenant ainsi l'autorégulation (e.g. Chambers et al., 2009) et la gestion émotionnelle (e.g. Tang & Posner, 2009) .

Le CI a été caractérisé à plusieurs niveaux, tels que le niveau cognitif, comportemental, physiologique et cérébral. Chacun de ces facteurs est susceptible d'influencer à la fois le CI et la réceptivité à l'entraînement. L'objectif de ce doctorat a été de préciser le rôle de ces facteurs dans l'efficacité et l'entraînement du CI, dont la pratique de méditation de pleine conscience, lors des périodes importantes de son développement, i.e. l'enfance et l'adolescence.

La première partie de cette thèse est consacrée à deux grands chapitres d'introduction. Premièrement, nous introduirons les fonctions exécutives, et tout particulièrement le CI, mettant en exergue son rôle crucial dans le développement. Par la suite, nous évoquerons les taxonomies du CI et réaliserons une caractérisation multi-niveaux des capacités d'inhibition, fournissant une vue d'ensemble sur les facteurs en jeu lors de l'entraînement cognitif durant les périodes clés du développement. Nous mettons l'accent sur l'enfance et l'adolescence en tant que fenêtres développementales critiques de la maturation cérébrale et de l'efficacité du CI. Dans le second chapitre de l'introduction, nous présenterons la méditation de pleine conscience, ses principales interventions, ainsi que les mécanismes cognitifs et les bases cérébrales associées au CI lors de la pratique méditative. Nous évoquerons également les effets neurocognitifs de la pleine conscience durant l'enfance et l'adolescence.

La seconde partie de cette thèse sera consacrée à la description du projet APprentissages EXécutifs (APEX) dans lequel a été réalisé cette thèse, projet mis en place pour tester l'effet des entraînements sur tablette tactile, réalisé à domicile pendant cinq semaines. Trois interventions ont été étudiées dans le projet, i.e. un entraînement ciblant directement le CI, la méditation de pleine conscience et un groupe contrôle actif, chez les enfants et les adolescents.

Dans la troisième partie de cette thèse, nous exposerons nos contributions expérimentales et présenterons les détails de nos trois études. Notre première étude aura pour objectif de comparer les effets différentiels sur les habiletés d'inhibition froide et chaude chez les enfants et les adolescents de la méditation de pleine conscience et de l'entraînement ciblant le CI. Dans notre deuxième étude, nous évaluerons l'influence du taux de glycémie sanguine et de l'indice de masse corporelle sur l'efficacité du CI et la réceptivité à l'entraînement chez les adolescents ayant suivi les trois différentes interventions. Notre

troisième étude portera sur la caractérisation de l'effet à long terme des contraintes neurodéveloppementales précoces, mesuré à partir de l'analyse des motifs sulcaux du cortex cingulaire antérieur, sur l'efficacité du CI et sur la réceptivité à l'apprentissage chez les enfants et les adolescents.

Enfin, notre discussion générale fournira une synthèse des trois études expérimentales, ainsi que leur analyse critique, évoquant d'éventuelles améliorations de l'entraînement proposé. En outre, nous mettrons l'accent sur les perspectives translationnelles non seulement sur l'entraînement ciblant le CI, mais également – et principalement – sur la méditation de pleine conscience vers l'éducation.

# Publications

---

## Articles publiés :

Menu, I. & **Rezende, G.** & Stanc, L. & Borst, G. & Cachia, A. (2022). Inhibitory control training on executive functions of children and adolescents: A latent change score model approach. *Cognitive Development*. 64. 101231. 10.1016/j.cogdev.2022.101231.

Menu, I., **Rezende, G.**, Le Stanc, L., Borst, G. & Cachia, A. (2022). A network analysis of executive functions before and after computerized cognitive training in children and adolescents. *Science Reports*, **12**, 14660. <https://doi-org.ezproxy.u-paris.fr/10.1038/s41598-022-17695-x>

## Article soumis :

**Rezende, G.**, Le Stanc, L., Menu, I., Cassotti, M., Aïte, A., Salvia, E., Houdé, O., Borst, G., & Cachia, A. (2022). Differential effects of mindfulness meditation and cognitive training on cool and hot inhibitory control in children and adolescents. Soumis.

## Communication orale :

**Rezende, G.**, Menu, I., Borst, G., & Cachia, A. (2022). Effets de la méditation de pleine conscience sur le contrôle inhibiteur chaud et froid chez les enfants et les adolescents. 7ème journée francophone de Psychologie Positive. Grenoble – France, 13 juin.

**Communications affichées :**

**Rezende, G.**, Menu, I., Borst, G., & Cachia, A. (2021). Effets de la méditation de pleine conscience sur le contrôle inhibiteur chaud et froid chez les enfants et les adolescents. 61<sup>ème</sup> Conférence de la Société Française de Psychologie. Tours – France, 8-10 décembre

**Rezende, G.**, Le Stanc, L., Menu, I., Cassotti, M., Aïte, A., Salvia, E., Houdé, O., Borst, G., & Cachia, A. (2022). Differential effects of mindfulness meditation and cognitive training on cool and hot inhibitory control in children and adolescents. 22<sup>nd</sup> ESCOP meeting. Lille – France, August 29<sup>th</sup> – September 1<sup>st</sup>.

**Rezende, G.**, Le Stanc, L., Menu, I., Cassotti, M., Aïte, A., Salvia, E., Houdé, O., Borst, G., & Cachia, A. (2022). Differential effects of mindfulness meditation and cognitive training on cool and hot inhibitory control in children and adolescents. 10<sup>th</sup> Annual Flux Congress. Paris – France, September 6<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup>.

1

# CHAPITRE

Le contrôle inhibiteur

Une composante exécutive clef

## 1. Le contrôle inhibiteur, une composante exécutive clef

### 1.1. Les fonctions exécutives

#### 1.1.1. Définition

Les fonctions exécutives (FE), regroupées également sous l'appellation « contrôle exécutif », « système exécutif » ou encore « contrôle cognitif » (Diamond, 2013), font référence à un ensemble de processus cognitifs de haut-niveau, dits *top-down* (Banich & Munakata, 2014; Luna et al., 2015), qui permettent l'organisation et la mise en place d'actions dirigées vers un but (Engelhardt et al., 2019). Précisément, les FE facilitent l'adaptation du sujet à des situations nouvelles, notamment lorsque les routines d'action ne sont plus suffisantes, pertinentes ou possibles (Diamond, 2013, 2020; Espy et al., 2004; Roy, 2015). Ces capacités révèlent leur importance dans de nombreux secteurs de la vie, tels que le succès professionnel (Bailey, 2007), la réussite académique (Allan et al., 2014; Diamond, 2011, 2012) et le développement d'aptitudes scolaires dont la lecture (Ahr et al., 2017; Ahr et al., 2016; Berninger et al., 2017; Butterfuss & Kendeou, 2018; Cartwright et al., 2019; Cirino et al., 2019) et les mathématiques (Roell et al., 2017; Viarouge et al., 2019; Wilkey et al., 2020). En outre, certaines études mettent en avant la place des FE dans la santé physique (Crescioni et al., 2011) et la qualité de vie (Huang et al., 2020). Des déficits exécutifs sont également présents dans divers troubles (Roy et al., 2012), comme le trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH, Diamond, 2005; Johnstone et al., 2010), les troubles du spectre autistique (TSA) (Corbett et al., 2009; Geurts et al., 2014), la dépression (Rock et al., 2014), le trouble obsessionnel-compulsif (TOC) (Snyder et al., 2015; Tubío Fungueiriño et al., 2020) et les addictions (Baler & Volkow, 2006; Feil et al., 2010; Goldstein & Volkow, 2011).

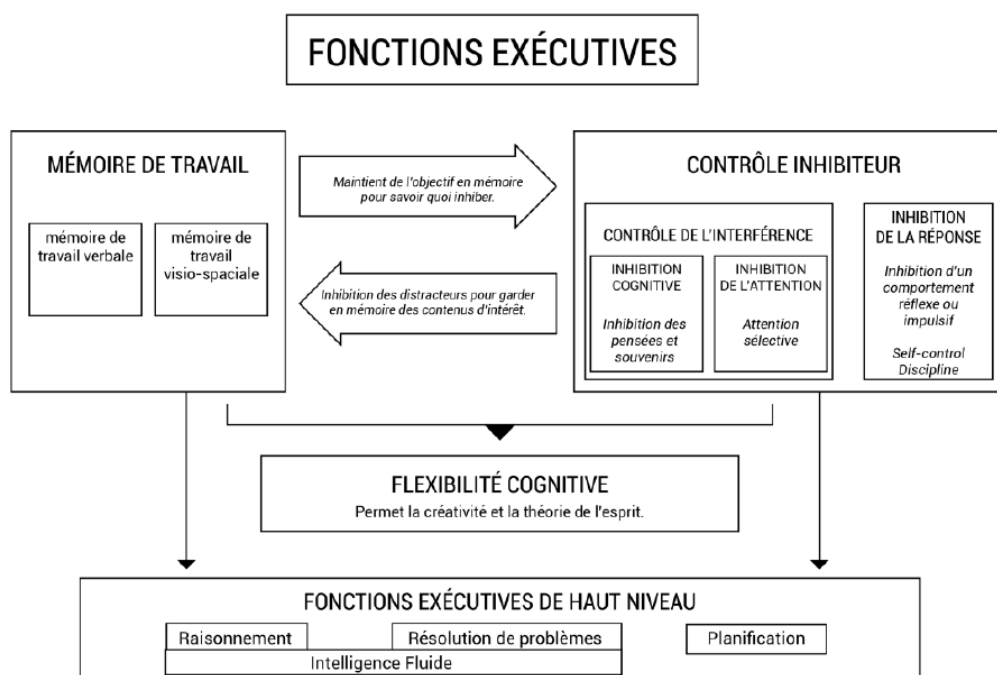
### 1.1.2. Modèle des fonctions exécutives

Les FE gèrent et administrent des fonctions plus spécifiques pour créer une réponse organisée, cohérente et optimale au contexte (Mazeau, 2009). Cependant, la taxonomie des FE fait l'objet de plusieurs débats (Kassai et al., 2019; Rey-Mermet et al., 2019). Elles ont donc été décomposées de différentes manières, par différents auteurs, afin de mieux rendre compte de leurs spécificités sur des contextes hétérogènes. De ce fait, il est possible de distinguer les composantes froides des FE – aussi nommées cool/cold en anglais – et les composantes chaudes, appelées hot. Cette dichotomie se base respectivement sur l'absence ou présence d'un contexte chargé émotionnellement. Les capacités froides renvoient à la planification, la détection de conflit, le raisonnement, l'attention soutenue, l'attention divisée, l'attention sélective, l'inhibition, la mise à jour en mémoire de travail et la flexibilité mentale (Roy, 2015), entre autres ; les capacités chaudes concernent plutôt l'autorégulation, la gestion émotionnelle, la cognition sociale, les théories de l'esprit, par exemple (Wade et al., 2018).

Dans leur étude princeps chez des jeunes adultes, Miyake et al. (2000) ont utilisé l'analyse factorielle confirmatoire sur des mesures classiques des FE pour conclure à un modèle de trois FE indépendantes mais corrélées. Bien que les FE partagent des processus sous-jacents, notamment pendant l'enfance, elles se montrent distinctes chez les jeunes adultes et sont sollicitées de manière spécifique en fonction de la tâche. De ce fait, plusieurs auteurs privilégient une taxonomie à trois composantes basales dans des études sur diverses populations (Best & Miller, 2010; Davidson et al., 2006; Diamond, 2006, 2011, 2013, 2020; Hughes, 1998; Lehto et al., 2003; Miyake et al., 2000). Néanmoins, il est important de souligner que ce modèle n'est guère exhaustif, il n'exclut donc pas l'existence d'autres FE (Friedman & Miyake, 2017).



Nous partons du modèle tripartite de Miyake et al. (2000) à la fois parce qu'un nombre élevé d'études s'inspirent de cette taxonomie et de nombreuses tâches cognitives fréquemment utilisées impliquent ces trois dimensions. Les FE sont ainsi décomposées en trois fonctions distinctes, interdépendantes : la mémoire de travail (MdT), le contrôle inhibiteur (CI) et la flexibilité mentale (Figure 1). Nous présentons par la suite chacune de ces composantes, ainsi que leur développement de l'enfance à l'âge adulte.



**Figure 1. Modèle des fonctions exécutives à 3 composantes ; schéma adapté de Diamond (2013)**

### **1.1.2.1. La mémoire de travail (MdT)**

La MdT représente un système mnésique à court-terme, de capacité limitée, qui permet le stockage et le maintien temporaire de l'information, ainsi que la manipulation des éléments dans l'espace mental lorsqu'ils ne sont plus disponibles au niveau perceptif (Baddeley, 2012; Baddeley & Hitch, 1974; Diamond, 2013). La MdT se distingue selon le contenu de l'information traitée, étant ainsi verbale ou visuo-spatiale. Baddeley (2012) décrit son fonctionnement à partir d'un schéma à deux composantes, gérées par un administrateur central – la clef exécutive. La boucle phonologique s'occupe du stockage des messages verbaux via la récapitulation articulatoire, qui est analogue au langage intériorisé ; le calepin visuo-spatial soutient la rétention visuelle des informations et la production d'imagerie mentale. En outre, cette FE est étroitement liée aux autres, notamment au contrôle inhibiteur (Diamond, 2013; Kane & Engle, 2000, 2002). Elle soutient l'apprentissage (e.g. la rétention de la consigne afin de bien l'effectuer, ainsi que l'intégration de nouveaux éléments aux informations en cours de traitement) ; le calcul mental ; la planification, entre autres (e.g. Carlin et al., 2000; Radüntz, 2020; Raghobar et al., 2010).

Le développement de la MdT débute précocement et atteint un plateau après l'adolescence, principalement vis-à-vis de la gestion d'éléments dans l'espace mental (Best & Miller, 2010). Des améliorations marquées de la MdT caractérisent la période entre 5 et 11 ans (Diamond, 2020), les enfants ayant un progrès important à des tâches d'empan complexes qui requièrent la mise à jour et la manipulation d'informations dans un contexte d'interférence, tels que les tâches d'empan spatial et d'empan de comptage (Case, 1992). Pour la MdT verbale, les performances s'améliorent de 6 ans jusqu'à 15 ans au moins, voire tout au long de l'adolescence (Siegel, 1994). En accord avec ce constat, Gathercole et al. (2004) ont rapporté que la composante exécutive de la MdT est déjà en exercice dès l'âge de 6 ans, permettant aux enfants de gérer les informations entre la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial.

Dans la continuité des résultats comportementaux, le développement de la MdT s'affiche linéaire, prolongé et hébergé notamment dans le CPF (Kane & Engle, 2002). En effet, Kwon et al. (2002) ont repéré une augmentation linéaire de l'activité dans le réseau fronto-pariétal de 7 à 22 ans, comprenant le CPF ventral et dorsal durant la tâche N-Back qui évalue la MdT visuo-spatiale. Les auteurs mettent en exergue que l'activité accrue au sein du CPF dorsal droit accompagne la maturation de l'attention visuo-spatiale, ainsi que le raffinement des processus exécutifs. De même, l'activité dans le réseau fronto-pariétal gauche témoigne de la maturation d'un système rappelant la boucle phonologique (Baddeley & Hitch, 1974).

#### **1.1.2.2. Le contrôle inhibiteur**

Le CI, aussi appelé inhibition, permet de résister aux automatismes, tentations, distractions ou interférences et de s'adapter à des situations conflictuelles (Diamond, 2013, 2020; Houdé, 2000; Houdé & Borst, 2014). Il s'agit d'un mécanisme essentiel du développement cognitif et socio-émotionnel. En effet, le CI est la clef pour supprimer une réponse prépotente, généralement ancrée par l'habitude, lorsque celle-ci n'est plus en adéquation avec le but envisagé (Diamond, 2013; Luna, 2009). Les capacités d'inhibition sont requises lors de nombreuses situations, telles que surpasser des idées communément reçues (Banich et al., 2019) ; ignorer les interférences ou les stimuli non-pertinents afin de privilégier un stimulus précis (Korbach & Unger, 2014a) ; bloquer ou suspendre une réponse cognitive, motrice ou émotionnelle non-désirée (Aïte et al., 2018; Aron et al., 2007; Logan & Cowan, 1984) ; résister à des heuristiques cognitives et orienter la pensée à une réponse plus logique (Aïte et al., 2018; De Neys, 2014; De Neys & Pennycook, 2019; Houdé, 2014a, 2019; Mevel et al., 2015, 2019), entre autres.

De nombreuses études ont montré que le CI est un prédicteur de la réussite scolaire et professionnelle, ainsi que de l'adaptation sociale au cours de la vie (Diamond, 2013; Kim et al., 2013; Moffitt et al., 2011). Précisément, le développement de compétences complexes, telles que l'arithmétique (Blair & Razza, 2007; Roell et al., 2017; Roell et al., 2019; Viarouge et al., 2019), la lecture (Ahr et al., 2017; Ahr et al., 2016; Borst et al., 2015; Brault Foisy, 2015), le raisonnement logique (Bago et al., 2019; Boissin et al., 2021; Borst et al., 2015; De Neys, 2014; De Neys & Pennycook, 2019; Houdé, 2014b), la théorie de l'esprit (Aïte et al., 2016; Draperi et

al., 2022; Marcovitch et al., 2015), les prises de décision (Aïte et al., 2018; De Neys et al., 2020; Osmont et al., 2014) et la créativité (Camarda et al., 2018; Cassotti et al., 2016) font appel à l'efficacité du CI. Dans le développement atypique, les déficits d'inhibition sont présents dans plusieurs pathologies psychiatriques, comme le TDAH (Bhajiwalla et al., 2014; Brown & Landgraf, 2010; Geurts et al., 2006) et la schizophrénie (Ethridge et al., 2014; Galaverna et al., 2012).

Le CI étant le principal objet d'étude de cette thèse, nous nous approfondirons sur cette composante au cours de sections suivantes, ses aspects développementaux, neuroanatomiques, fonctionnels, entre autres.

### **1.1.2.3. La flexibilité mentale**

Soutenue par la MdT et le contrôle inhibiteur, la flexibilité mentale (shifting/switching) désigne la souplesse cognitive, l'aptitude à modifier sa propre représentation et à basculer sur une autre (Plata, 2013). Elle permet la désactivation d'une représentation afin d'en activer une nouvelle, celle-ci étant plus à même de répondre au contexte. Il est donc possible de jongler entre les différentes perspectives, comportements, tâches ou stratégies.

La flexibilité mentale, dite aussi « cognitive », se développe plus tard que les deux autres FE sur lesquelles elle s'appuie (Davidson et al., 2006; Diamond, 2013; Garon et al., 2008). Piaget & Inhelder (1948) ont remarqué que la décentration progressive de soi comme unique point de repère devient effective à l'âge de 9 ans, quand l'enfant est assurément capable de considérer et d'intégrer d'autres points de vue dans la représentation de l'espace projectif. Le basculement efficace entre les points de vue suppose la compréhension des propriétés intrinsèques de l'objet, qui restent inchangées malgré les différentes perspectives adoptées (e.g. bien que la lune semble être petite dans le ciel, elle sera grande vue de l'espace, et ce sans que sa taille ne change pour autant). De plus, pour changer de perspective, il est nécessaire d'inhiber la perspective précédente et d'en activer en mémoire la nouvelle (Diamond, 2013, 2020). C'est en ce sens que la flexibilité mentale fait recours au contrôle inhibiteur et à la MdT.

La flexibilité mentale est également impliquée dans l'aptitude à développer des idées au-delà de l'ordinaire, la capacité à s'adapter à de nouvelles conditions, imaginer de nouvelles solutions à un ancien problème ou tenir compte des émotions d'autrui (Vásquez-Rosati et al., 2019). Dans le développement typique, les enfants réussissent vers l'âge de 2 ans et demi les tâches d'inversion intradimensionnelle, c'est-à-dire deux schémas distincts de stimulus-réponse sur une même dimension (e.g. commencer par la tâche A en appuyant à gauche pour la couleur rouge et à droite pour le vert, puis faire l'inverse dans la tâche B) (Diamond, 2013). Cependant, la coordination de différentes dimensions au sein d'un seul stimulus, comme dans la Dimensional Change Card Sort Test (DCCS), n'est réussie que vers l'âge de 4½ à 5 ans (Zelazo et al., 1996; Zelazo, 2008). La flexibilité mentale s'améliore progressivement pendant toute l'enfance et décline durant le vieillissement (Diamond, 2013).

### **1.1.3. Spécificité et complémentarité des fonctions exécutives**

Les trois FE de base rendent compte à la fois de l'unité des processus cognitifs et de leur diversité. De nombreuses études soutiennent des FE plurielles (Rey-Mermet et al., 2019; Zabelina et al., 2019), mais interdépendantes (Davidson et al., 2006; Harnishfeger & Bjorklund, 1994). Précisément, leur action est souvent reliée, e.g. la MdT nécessite le CI pour alléger l'espace de travail mental d'une charge cognitive trop élevée, en supprimant l'entrée d'éléments non-essentiels (Diamond, 2013). Réciproquement, la MdT permet d'allouer des ressources au CI en maintenant à l'esprit l'objectif et/ou la consigne de la tâche effectuée (Chmielewski et al., 2016; Diamond, 2013). De plus, la flexibilité mentale requiert le CI pour bloquer la perspective initiale et la MdT afin d'enregistrer les directives pour la nouvelle perspective à adopter (Diamond, 2013). A l'inverse, la flexibilité permet la souplesse des opérations mentales réalisées en MdT (Diamond, 2013), dont la résolution dépend aussi du CI pour bloquer des stratégies inefficaces et/ou des éléments qui ne sont pas pertinents à sa réalisation (Houdé, 2014b). Dans une perspective développementale sur une cohorte de 7 à 15 ans, Hartung et al. (2020) suggèrent que les FE passent progressivement d'une action unitaire à une expression plus multidimensionnelle. Dans cette optique, les auteurs indiquent que le CI peut avoir une variance spécifique par rapport aux autres composantes, qui se

distingue de plus en plus avec l'âge à partir d'une FE commune durant la petite enfance, et ce malgré le problème majeur d'impureté relevé dans les tâches mesurant l'inhibition, notamment au cours de la petite enfance (Snyder et al., 2015).

L'imagerie cérébrale soutient également l'existence de cette dichotomie entre l'université et la diversité des fonctions exécutives au cours de la vie. En effet, les réseaux cérébraux sollicités par les différentes FE présentent des recouvrements mais aussi des spécificités. La littérature rapporte un réseau fronto-pariétal partagé entre les FE (Niendam et al., 2012) comme le montrent les activations dans diverses tâches exécutives (Fedorenko et al., 2013). En effet, elles sont souvent associées au cortex préfrontal (CPF), notamment chez les patients ayant des lésions frontales qui présentent des difficultés à exercer efficacement un comportement dirigé vers un but. Ce comportement fait interagir des zones frontales, corticales et sous-corticales (Royall et al., 2002), mais le CPF joue un rôle important dans la coordination des aires. Dans une méta-analyse sur les corrélats neuronaux des FE, Alvarez et Emory (2006) avancent que les aires frontales y sont significativement activées, bien que pas exclusivement. Effectivement, Leh et al. (2010) soulignent que le fonctionnement exécutif inclut les zones corticales et sous-corticales, et ce en fonction des spécificités des FE sollicitées. Par exemple, la prise de décision dans un contexte émotionnel active les connexions entre le cortex préfrontal et la région limbique. Précisément, le cortex orbitofrontal, le noyau dorsomédian du thalamus, le striatum ventral et le pallidum ventral permettent la détection du conflit entre les gains et les récompenses attendues. Dans l'ensemble, ces arguments reflètent la diversité/spécificité des FE (Figure 1), exprimant à la fois des réseaux communs et des réseaux différents (Diamond, 2013; Karr et al., 2018; Teuber, 1972).

Nous allons maintenant porter un regard approfondi sur le CI, le principal objet d'étude de cette thèse, en explorant les différentes taxonomies qui essaient de rendre compte de ses spécificités, ainsi que l'entraînement de cette FE et ses effets potentiels.

## 1.2. Taxonomies du contrôle inhibiteur

En raison du large éventail d'aptitudes expliquées par le CI, son concept peut couvrir des processus cognitifs distincts, compromettant sa définition et son utilité en tant que construit explicatif à part entière (Aron, 2007; Nigg, 2000; Tiego et al., 2018). De ce fait, diverses taxonomies du CI ont été développées afin de décortiquer les processus en jeu dans cette FE.

Un grand nombre de taxonomies font la distinction entre les composantes principales du CI, e.g. la composante comportementale et la composante cognitive (Bari & Robbins, 2013). Cette distinction relève non seulement la question déjà évoquée sur l'unicité du processus inhibiteur, mais également sur l'emboîtement des composantes inhibitrices, dont la nomenclature peut varier selon les auteurs, ce qui peut alimenter un manque de clarté vis-à-vis du concept (Perret, s. d.; Tiego et al., 2018). Il est donc très important d'examiner les taxonomies pour que toute référence à une composante soit claire.

### 1.2.1. Taxonomie d'Harnishfeger (1995)

Harnishfeger (1995) distingue trois dimensions du CI, la première concernant la nature des processus, qui inclut l'inhibition comportementale et l'inhibition cognitive ; la deuxième dimension concerne l'intentionnalité, comprenant l'inhibition contrôlée et l'inhibition automatique ; la troisième dimension se réfère au caractère actif ou passif du CI.

Dans la première dimension, l'inhibition comportementale implique la suppression ou suspension de réponses motrices, comme on l'observe dans la tâche Stop Signal (Logan & Cowan, 1984) ; et la résistance à la tentation ou le contrôle des impulsions, comme le propose la tâche du Marshmallow (Mischel, 2014). Logan et al. (1997) font également un point sur la relation complexe entre le CI et l'impulsivité. En utilisant la tâche Stop Signal, les auteurs ont observé que sujets très impulsifs présentent des temps de réponse plus longs aux essais stop, ce qui peut paraître contre-intuitif. Cependant, cela suggère que les individus impulsifs présentent des difficultés à inhiber les réponses prépotentes non parce que leurs réponses

sont exceptionnellement rapides, mais plutôt parce que le CI est déficitaire et répond de manière exceptionnellement lente. Parallèlement, l'inhibition cognitive renvoie à la suppression des contenus préalablement activés qui ne sont plus appropriés pour la réponse optimale, tel que l'on peut le constater dans une tâche d'amorçage négatif (Tipper, 1985).

Smith et al. (2008) étayent la dissociation entre l'inhibition comportementale et l'inhibition cognitive au niveau des potentiels évoqués, mesurés par l'électroencéphalographie (EEG). A partir d'un paradigme classique de Go/NoGo, les auteurs ont conclu que le potentiel évoqué P3 constitue un marqueur spécifique de l'inhibition comportementale. Cela s'explique par l'effet NoGo de P3, qui est nettement plus élevé lors de l'inhibition motrice effective que pour l'inhibition non-motrice. En contrepartie, le potentiel N2 peut refléter une étape non motrice du CI, c'est-à-dire la reconnaissance de la nécessité de l'inhibition de la réponse. En effet, un N2 frontal et un P3 frontocentral sont souvent reportés dans la tâche Go/NoGo lors des essais où l'inhibition est nécessaire (Bekker et al., 2004; Smith et al., 2006). Pour Perret (2003), ces composantes sont intimement associées bien que distinctes, l'inhibition motrice étant alors le fruit de l'inhibition des schémas cognitifs. Par exemple, dans un Go/NoGo hypothétique, le sujet doit appuyer sur un bouton face à tous les animaux sur l'écran (Go), sauf s'il s'agit d'un insecte (NoGo). Il doit donc accéder en amont à son propre répertoire vis-à-vis des animaux (Go) et des insectes (NoGo) pour être à même de bien détecter le conflit et stipuler la suite d'actions à exécuter.

Considérant alors la dimension de l'intentionnalité, l'inhibition contrôlée et consciente fait référence à une résistance intentionnelle face à des stimuli trompeurs et inadaptés, tandis que l'inhibition automatique et inconsciente s'applique à des schèmes perceptifs, automatiques, extérieurs à l'attention mentale et à la volonté de l'individu (Linzarini et al., 2017). Effectivement, ce contrôle inconscient pourrait constituer une étape avancée du développement cognitif ou l'aboutissement d'un entraînement exécutif puisque la gestion des informations ou des stratégies non pertinentes pour la tâche en cours passe à se faire involontairement, en dehors de la conscience (Houdé & Borst, 2014; Linzarini et al., 2017).

Quant à l'aspect actif ou passif du CI, les définitions s'entrecroisent avec celles décrites précédemment. En effet, le contrôle actif renvoie à l'inhibition cognitive, à savoir le blocage d'une stratégie inadaptée afin d'exécuter une réponse optimale. Le contrôle passif, appelé « résistance à l'interférence », filtre les stimuli inadéquats en MdT, invoquant ainsi des



processus autres que le CI (Wilson & Kipp, 1998). La résistance à l'interférence est impliquée dans l'inhibition d'informations non pertinentes qui sont présentées simultanément avec des informations pertinentes.

### **1.2.2. Taxonomie de Dempster et Corkill (1999)**

Les auteurs argumentent que le CI varie selon le type d'interférence auquel il est confronté, considérant le caractère moteur, perceptif ou verbal de l'interférence. Le processus d'inhibition à l'intérieur de chaque catégorie dépend également de la source endogène ou exogène de chaque interférence, ainsi que sa temporalité – simultanée ou séquentielle.

Dempster et Corkill (1999) définissent l'interférence motrice comme la suppression d'actes moteurs qui deviennent non appropriés, comme on l'observe lors de la tâche de Stop-signal (Logan & Cowan, 1984). Pour le type perceptif, l'interférence désigne la capacité à résister à la distraction causée par des stimuli visuels saillants, à l'exemple des tâches d'attention sélective. De plus, l'interférence verbale accuse la présence de stimuli linguistiques non pertinents pour répondre à la consigne ; un exemple est la tâche de Stroop (Stroop, 1935) Les auteurs ajoutent que ces trois types de résistance exhibent des motifs de développement propres et successifs (Pennequin et al., 2004). De la naissance jusqu'à l'âge de 2 ans, l'interférence motrice est prédominante. Entre 2 ans et 6 ans, celle-ci diminue et laisse place à une sensibilité croissante à l'interférence perceptive. A 6 ans, l'enfant devient plus sensible à l'interférence verbale. A partir de 8 ans, la sensibilité vis-à-vis des trois types d'interférence décline jusqu'à minimum 16 ans.

### **1.2.3. Taxonomie de Friedman & Miyake (2004)**

Dans cette taxonomie, un modèle tripartite du CI est proposé. La première composante se réfère à l'inhibition de réponses dominantes, qui implique la suppression de réponses saillantes, prépotentes ou automatisées, comme lors de la tâche Stop Signal. Deuxièmement, le CI est décrit comme l'inhibition de la résistance à l'interférence provenant des distracteurs. Dans cette catégorie, les capacités inhibitrices sont impliquées dans blocage

d'une information exogène, trompeuse, comme les flèches en sens opposé dans la tâche Flankers. La troisième catégorie, appelée l'inhibition de la résistance à l'interférence proactive, correspond au blocage d'informations précédemment pertinentes pour une tâche donnée, devenues inefficaces par la suite.

#### **1.2.4. Taxonomie de Diamond (2013)**

Diamond (2013) divise le CI de manière dichotomique : le contrôle de l'interférence et l'inhibition de la réponse, la distinction concernant les processus de gestion ou de blocage d'éléments. Précisément, le contrôle de l'interférence implique la gestion de l'interférence provoquée par un stimulus distracteur qui court-circuite le stimulus cible. Cette catégorie se subdivise alors en fonction de la source du stimulus distracteur. D'une part, l'inhibition cognitive s'adresse aux stimuli endogènes, les processus cognitifs qui doivent être bloqués ; d'autre part, l'inhibition de l'attention aux stimuli exogènes, comme lors des tâches de Flankers ou l'Attentional Network Task (Fan et al., 2002).

De même, l'inhibition de la réponse permet le blocage d'un comportement réflexe ou impulsif. Cela concerne la tâche Stop Signal, dont le but est de bloquer les réponses motrices lorsqu'un signe sonore survient ; ou également les tâches de gratification différée, permettant au sujet de refuser un petit gain immédiat au profit d'un gain plus important sous un plus large délai.

Selon Diamond (2013), les analyses factorielles signalent une forte corrélation entre l'inhibition de l'attention et l'inhibition de la réponse, les deux s'alignant sur un seul facteur plus général (Friedman & Miyake, 2004), comme la maîtrise de soi. Ainsi, la littérature avance un affaiblissement des performances lorsque les personnes exercent un type de maîtrise de soi, comme résister à des sucreries, puis doivent passer à autre type de maîtrise de soi, comme la tâche Stop Signal. Cette dégradation des performances n'a pas lieu si la première tâche exécutée ne sollicite pas la maîtrise de soi, comme les calculs mathématiques (Muraven & Baumeister, 2000).

### 1.2.5. Taxonomie de Nigg (2000)

Considérant qu'un CI dysfonctionnel impacte la trajectoire développementale et influence la psychopathologie, Nigg (2000) propose une taxonomie psychopathologique développementale de l'inhibition. Il apporte ainsi un regard plus approfondi de la psychopathologie à partir des processus inhibiteurs. Selon ce paradigme, le développement individuel influence le cadre clinique par divers moyens, tels que la maturation cérébrale et biologique, la cognition ou les aptitudes sociales. D'autre part, les expressions psychopathologiques influencent le développement à leur tour, court-circuitant les jalons développementaux (Speranza & Valeri, 2010).

Le CI est donc divisé en trois types : l'inhibition exécutive, le contrôle automatique de l'attention et les mécanismes inhibiteurs impliqués dans les contextes émotionnels.

L'inhibition exécutive se sous-divise en inhibition cognitive, inhibition comportementale volontaire, contrôle de l'interférence et contrôle oculomoteur. La première est mise en place pour bloquer les pensées indésirables avant qu'elles ne soient intégrées en MdT, celles-ci n'étant pas nécessairement associées à la réponse comportementale envisagée. Parallèlement, l'inhibition comportementale volontaire renvoie à la suppression d'une réponse motrice inefficace ou inadaptée, en cours ou déjà automatisée. Le contrôle de l'interférence désigne le blocage de distracteurs qui entrent en compétition avec les éléments pertinents pour la réponse, pouvant donc déclencher des erreurs. Enfin, le contrôle oculomoteur reflète le blocage volontaire de saccades oculaires réflexes. Toutes ces expressions de l'inhibition exécutive supposent l'intervention des mécanismes de contrôle, appelés exécutifs (Collette & Salmon, 2014).

L'inhibition automatique de l'attention est impliquée dans la suppression d'éléments visuels perçus ou situés hors du focus attentionnel. Pour conclure, les mécanismes inhibiteurs impliqués dans les contextes émotionnels font référence à l'inhibition de la réponse à des stimuli aversifs, ainsi que l'inhibition de la réponse à la nouveauté, qu'elle soit automatique ou volontaire. Ces deux expressions de l'inhibition surviennent dans des contextes émotionnellement chargés.

### 1.2.6. Taxonomie de Zelazo et Müller (2002)

Zelazo et Müller (2002) catégorisent le CI selon la présence ou absence des paramètres affectifs. Ainsi, l'inhibition dite froide intervient dans les contextes dépourvus de source émotionnelle, tandis que l'inhibition chaude a lieu dans des situations émotionnellement chargées, impliquant la motivation et la régulation des émotions (Aïte et al., 2018; Prencipe et al., 2011; Zelazo & Carlson, 2012; Zelazo & Müller, 2002a). Dans ce sens, le CI froid est essentiel pour la résolution des problèmes sans les composantes affectives (Fernández García et al., 2021), alors que le CI chaud joue un rôle fondamental dans la régulation des émotions (Cardinale et al., 2019; Carlson & Wang, 2007; Nigg, 2017; Thompson, 2018; Zelazo & Cunningham, 2007).

Dans le champ de la pathologie, la distinction entre les aspects chaud et froid du CI fait également l'objet d'études. Par exemple, Huijbregts et al. (2008) ont validé l'hypothèse selon laquelle les enfants exposés au tabac pendant la période prénatale sont plus susceptibles à des dysfonctionnements exécutifs lorsque les tâches impliquent une charge émotionnelle, en particulier en ce qui concerne les capacités d'inhibition. Précisément, les enfants exposés au tabagisme prénatal présentent un risque plus élevé de déficits de CI chaud, mais la performance du CI froid demeure stable. Parallèlement, McIntyre et al. (2006) soulignent que de bonnes capacités de CI chaud prédisent des aptitudes prosociales plus importantes chez les jeunes enfants, selon l'évaluation par des enseignants en maternelle.

Zelazo & Müller (2002) enrichissent cette distinction en associant des structures cérébrales propres aux paramètres froid et chaud. Dans cette optique, les aspects froids requièrent les régions dorsolatérales du CPF, alors que aspects chauds reposent davantage sur des régions ventrales et médianes. Krain et al. (2006) fournissent des preuves sur cette distinction neurofonctionnelle dans une méta-analyse sur la prise de décision face au risque, i.e. prise de décision chaude, en comparaison à la prise de décision dite ambiguë, i.e. froide, où les récompenses proposées ne diffèrent pas en valeur. Précisément, les paramètres chauds sollicitent plus les régions du cortex orbitofrontal, tandis que le CPF dorsolatéral présente plus d'activations dans la prise de décision froide.

Enfin, d'autres taxonomies du CI sont proposées par divers auteurs. La distinction entre l'inhibition volontaire et l'inhibition automatique renvoie à la comparaison entre les processus conscients, intentionnels et cognitivement coûteux versus les processus déclenchés inconsciemment comme lors des paradigmes d'amorçage négatif, c'est-à-dire lorsque la réaction à un stimulus-cible est plus lente si ce même stimulus a été employé comme distracteur à l'essai précédent (Chiu & Aron, 2014). En outre, l'inhibition exécutive mise en place volontairement se différencie de l'inhibition exécutive provoquée par un stimulus non repéré par la conscience, comme dans les tests employant un paradigme d'amorçage Go/no-Go avec un masque qui n'est pas perçu consciemment (Chiu & Aron, 2014; Gaal et al., 2008, 2010, 2011). Parallèlement, l'inhibition réactive et l'inhibition proactive se distinguent, connues respectivement par le retrait (*withdrawal*) et la retenue (*withholding*) de la réponse motrice. Autrement dit, l'inhibition réactive représente la réaction à un signal d'arrêt, la suspension d'une opération motrice déjà engagée ; en contrepartie, l'inhibition proactive évoque la capacité de bloquer la tendance à donner une réponse motrice qui n'est pas pertinente. En effet, l'arrêt proactif n'est pas une conséquence des stimuli externes car il dépend des objectifs fixés par le sujet (Aron, 2011; Bhaijiwala et al., 2014). Cette distinction permet de mieux comprendre l'étiologie de certains troubles, tels que le syndrome de Gilles de la Tourette, les troubles obsessionnels compulsifs et les addictions, et donc de mieux cibler les traitements (Aron, 2011).

### **1.3. Reconfigurations post-piagésiennes : la théorie des systèmes**

Les théories post-piagésiennes modélisent le développement cognitif dans sa globalité tout en rendant compte des décalages horizontaux, du jalonnement d'erreurs et de régressions cognitives (Houdé, 2005). Kahneman (2012) propose la « Théorie des processus duaux », un modèle où deux systèmes de pensée coexistent de manière antagoniste. Précisément, le cerveau est à même de commettre des erreurs car il opère en mode cognitivement parcimonieux, i.e. un mode de fonctionnement rapide, automatique, heuristique, nommé « Système 1 » (De Neys & Pennycook, 2019). A l'opposé, le « Système 2 » représente un système algorithmique, analytique, plus lent car plus coûteux cognitivement, menant toujours à une réponse correcte (Evans, 2003). De par son utilisation quotidienne et

peu coûteuse, certaines heuristiques deviennent sur-apprises et court-circuitent le système algorithmique même à des âges tardifs (Houdé, 2019). C'est pour expliquer le basculement du Système 1 au Système 2 qu'un troisième système est envisagé. Ce système, qui peut également être perçu comme un processus cognitif d'arbitrage, permet résister aux heuristiques, i.e. de mettre en place les capacités d'inhibition, et d'activer les ressources pour la réponse (Borst et al., 2013; Houdé, 2000, 2019). Le CI constitue ainsi la fonction première de ce troisième système, qui s'affine au cours du temps afin de permettre une meilleure gestion des heuristiques et des algorithmes.

#### **1.4. Le développement du contrôle inhibiteur**

De nombreuses études ont montré que les capacités d'inhibition émergent durant la première année de vie (Holmboe et al., 2018; Johnson, 1995) et leur performance s'améliore avec l'âge, comme le démontrent les études en IRM fonctionnelle (Bunge et al., 2002; Paulsen et al., 2015; Rubia et al., 2000, 2006; Veroude et al., 2013) et comportementales (Allan et al., 2014; Bedard et al., 2002; Bjorklund & Harnishfeger, 1995; Dowsett & Livesey, 2000; Holmboe et al., 2018; Johnson, 1995; Smittenaar et al., 2015; Tannock, s. d.). En effet, les FE sont présentes dès la petite enfance, bien que plus rudimentaires (Diamond, 2002; Garon et al., 2008; Holmboe et al., 2018). À l'heure actuelle, il est bien établi que les capacités de base du CI émergent au cours du deuxième semestre de vie, comme l'indique la réussite à des épreuves telles que l'erreur « A-non-B », entre 7 et 12 mois (Bell & Fox, 1992; Diamond, 1991; Houdé, 1995). Selon Diamond (1991), l'erreur de localisation que fait le bébé provient de l'immaturation du CPF, sous-tendant le déficit d'inhibition d'un geste déjà programmé et renforcé, dirigé vers l'emplacement A. De plus, les singes subissant une lésion de l'hippocampe réussissent cette même épreuve, tandis que l'ablation du CPF dorsolatéral conduit à l'erreur A-non-B, corroborant le rôle de cette région dans la mise en place des capacités d'inhibition (Diamond & Goldman-Rakic, 1989).

Entre 3 et 5 ans, les compétences inhibitrices s'améliorent rapidement (Carlson, 2005; Diamond et al., 2002; Dowsett & Livesey, 2000; Espy et al., 2004; Holmboe et al., 2008; Wiebe et al., 2012), instaurant les bases pour des capacités ultérieures, plus complexes, telles que les

habiletés de catégorisation (Houdé, 2000), la théorie de l'esprit (Aïte et al., 2016; Benson et al., 2013; Draperi et al., 2022) et le raisonnement logique (Beck et al., 2009; Boissin et al., 2021; Houdé & Borst, 2015; Liu et al., 2015). Les performances d'inhibition se perfectionnent au cours des années scolaires jusqu'à environ 12 ans (Karchach & Unger, 2014a; Kray et al., 2009; Richardson et al., 2018; Roell et al., 2017; Rueda et al., 2004; Wilson et al., 2018). L'adolescence est alors caractérisée par le gain de précision dans les habiletés engageant le CI (Carver et al., 2001; Chevalier, 2010; Sung et al., 2021; Tannock, s. d.).

Il est important de souligner que les capacités inhibitrices ne se développent pas de manière concomitante selon leur nature, suggérant que les tâches expérimentales peuvent saisir des sous-processus distincts de contrôle cognitif (Nigg, 2000), comme nous l'avons décrit dans les différentes taxonomies du CI. Best & Miller (2010) ont proposé que les améliorations précoces du CI correspondent principalement à des changements qualitatifs dans le traitement des informations, alors que les celles survenant plus tardivement reflètent des changements quantitatifs basés sur des mécanismes cognitifs plus efficaces.

Dans ces sous-partie, nous mettons l'accent sur les spécificités développementales des composantes proactive et réactive, d'une part ; d'autre part, des composantes dites froides et chaudes.

#### **1.4.1. Contrôle inhibiteur actif et proactif**

Pour rappel, l'inhibition proactive, à savoir l'anticipation de la réponse à un stimulus (Aron, 2011; Verbruggen et al., 2012), implique un coût cognitif élevé, mais est souvent réussie. En contrepartie, l'inhibition réactive, i.e. la résolution de l'interférence, comprend un coût moindre sans garantir la réussite (Aron, 2011; Blay & Chevalier, 2014; Cai et al., 2016). Les enfants privilégient l'inhibition réactive, même lorsque celle-ci n'est pas adéquate (Chevalier et al., 2014). Par exemple, à l'âge de 3 ans, les enfants peuvent donner à l'oral la bonne réponse à un exercice, signalant l'inhibition d'une mauvaise réplique, mais échouent dans la rétention de la réponse motrice équivalente (Dowsett & Livesey, 2000). Zelazo et al. (1996) nomment « dissociation aboulque » l'incapacité à retenir la réponse motrice malgré la démonstration d'une réponse verbale correcte.

Le basculement entre un usage unitaire vers les deux composantes survient à environ 6 ans, comptant également une période d'adaptation où il y a un mélange entre le contrôle proactif et réactif (Blackwell et al., 2014). Cette capacité à permutation entre les composantes s'améliore jusqu'à l'adolescence et se stabilise chez les adultes, ceux-ci étant capables d'activer l'inhibition la plus adéquate à la tâche (Braver et al., 2009). De même, la littérature rapporte un ralentissement chez les personnes âgées, comme le démontre l'étude de Bedard et al. (2002) sur une cohorte de 6 à 82 ans.

#### **1.4.2. Contrôle inhibiteur froid et chaud**

Les théories neurocognitives du développement du CI s'attardent notamment sur l'enfance et l'adolescence, mettant en exergue l'importance de la maturation du CPF et d'autres régions essentielles pour le contrôle cognitif (Bedard et al., 2002; Casey et al., 2005; Diamond, 2002; Rubia et al., 2000, 2006). L'arrivée de la puberté évoque la part jouée par les structures cérébrales impliquées dans la gestion des émotions et la modulation des stimuli sociaux (Mills et al., 2014). La distinction des trajectoires neurodéveloppementales du CI tenant compte de ces spécificités renvoie à la dissociation entre le CI froid et le CI chaud.

Pour certains auteurs, la distinction entre ces deux composantes ne semble pas être claire durant l'enfance (Allan et al., 2014; O'Toole et al., 2018a; Tsermentseli & Poland, 2016). Il est également possible que la précision et la cohérence des deux concepts soient encore discutables dans les années préscolaires (Mehsen et al., 2021). La littérature rapporte que les formes élémentaires du CI froid, comme le retrait et la retenue des réponses motrices déjà déclenchées ou la surveillance des erreurs, sont présentes dès la petite enfance et continuent de progresser à l'adolescence et à l'âge adulte (Holmboe et al., 2008; Rubia et al., 2001, 2007). Néanmoins, c'est sur l'adolescence que s'étendent les débats à propos des capacités froides et chaudes. La physiologie indique que la gestion des stimuli socio-émotionnels interagit avec le développement pubertaire, mais cela n'est pas le cas des processus cognitifs neutres (Smith et al., 2013). Effectivement, le système limbique est sensible à l'augmentation subite d'hormones au début de la puberté, étayant des réponses plus intenses aux stimuli affectifs, sociaux, et aux récompenses (Blakemore & Mills, 2014). Ainsi, plusieurs modèles ont tenté de



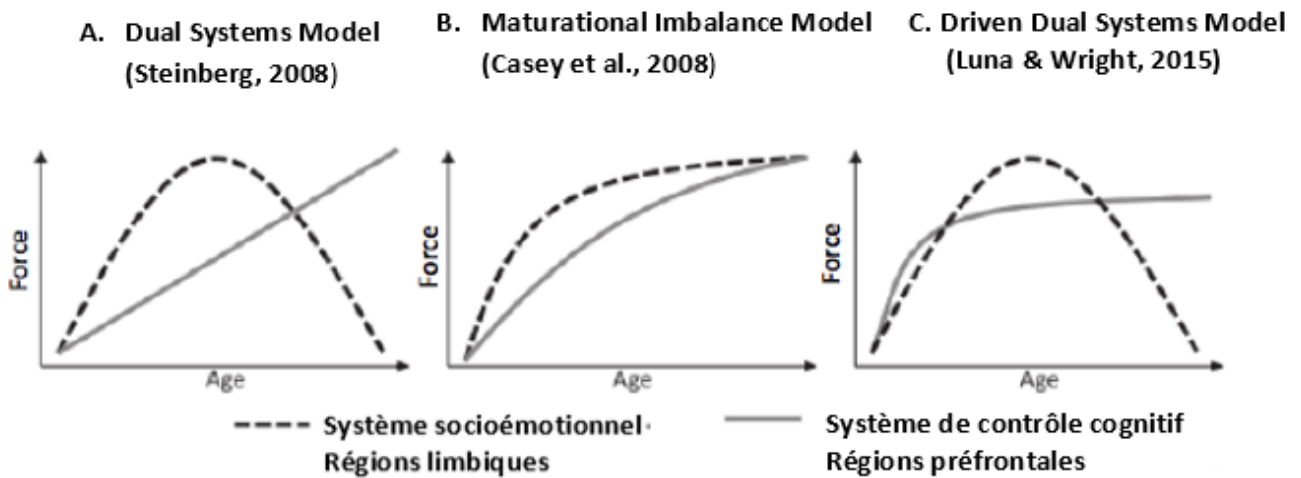
rendre compte des spécificités développementales de ces deux composantes lors de l'enfance et l'adolescence. Trois modèles principaux ressortent : le *Dual Systems Model* (Steinberg, 2010), le *Maturational Imbalance Model*, par Casey et al. (2008) et le *Driven Dual Systems* par (Luna & Wright, 2016).

Le modèle de Steinberg (2010) soutient l'idée d'une compétition entre les deux systèmes où siègent les deux composantes inhibitrices. Précisément, d'un côté, le système chargé des processus émotionnels et du traitement des récompenses, nommé « système socio-émotionnel » qui recrute le réseau limbique ; de l'autre côté, un système dit de « contrôle cognitif », responsable pour retenir les comportements impulsifs, sollicitant principalement le CPF. Ainsi, le *Dual Systems Model* avance que le système socio-émotionnel présente un pic de réactivité au début de l'adolescence, suivi d'une chute qui le caractérise à l'âge adulte. La gestion des stimuli affectifs et sociaux présente donc une trajectoire en U inversé, contrairement au système de contrôle qui se développe linéairement de l'enfance à l'âge adulte (Steinberg, 2008, 2010). Dans ce cas, l'adolescence constitue une période de vulnérabilité où les capacités de CI chaud sont plus faibles que celles des enfants et des adultes en raison de cette hypersensibilité émotionnelle (Durston et al., 2002; Luna, 2009). Aïte et al. (2018) corroborent que les performances du CI froid s'améliorent linéairement de l'enfance à l'âge adulte, alors que les capacités chaudes affichent une trajectoire non linéaire et quadratique, la réactivité émotionnelle atteignant le sommet à l'adolescence pour redescendre à l'âge adulte.

Bien que le *Maturational Imbalance Model* reprenne la concurrence entre ces deux systèmes, le pattern développemental de chaque composante diffère du modèle précédent. Pour Casey et al. (2008), le système socio-émotionnel exhibe une augmentation de son activité de l'enfance jusqu'au milieu de l'adolescence afin d'atteindre un plateau, tandis que le système de contrôle subit une maturation plus lente. Ainsi, face aux situations chargées affectivement, le système limbique tient l'avantage sur le système de contrôle préfrontal. En effet, des études en IRM fonctionnelle ont rapporté un pic de sensibilité à la récompense dans le noyau accumbens chez les adolescents par rapport aux enfants et aux adultes (Galvan et al., 2006; Padmanabhan & Luna, 2014; Paulsen et al., 2015). De même, la réactivité accrue aux récompenses s'associe à une immaturité des zones de contrôle, ce qui peut inciter les adolescents à privilégier des gains immédiats plutôt que ceux à long terme (Mills et al., 2014).

Les particularités de l'adolescence évoquent donc l'écart entre la maturation corticale, notamment le CPF, et sous-corticale, incluant l'amygdale, le striatum ventral et le noyau accumbens. Selon ce modèle, ce n'est que vers le début de l'âge adulte que le système de contrôle passe à contraindre progressivement le système socio-émotionnel (Casey et al., 2008), permettant la mise en place des processus d'autorégulation plus efficaces. En effet, à l'entrée dans l'âge adulte, l'augmentation du nombre et de la force des connexions frontales avec les régions corticales et sous-corticales permet une amélioration qualitative des mécanismes de contrôle, reflétant des progrès comportementaux dans plusieurs tâches qui mesurent le CI (Hwang et al., 2013).

Dans le modèle *Driven-Dual Systems*, Luna & Wright (2016) reprennent l'idée de la trajectoire en U inversé caractérisant le développement socio-émotionnel, mais la maturation du système de contrôle cognitif atteindrait un plateau à partir du milieu de l'adolescence. Au niveau comportemental, cette nuance est corroborée par les performances des adolescents sur des mesures de CI froid, qui sont statistiquement similaires à celles des adultes (Luciana & Collins, 2012). De plus, Parr et al. (2021) ont constaté que la connectivité entre le cortex cingulaire antérieur ventral, subgénial et l'orbitofrontal avec le noyau accumbens subit une diminution de l'adolescence à l'âge adulte, ce qui correspond à des prises de risques amoindries et des décisions plus réfléchies face aux récompenses lors de cette période. Cela est médié par l'action dopaminergique dans les circuits frontostriataux, dont la spécialisation structurelle et fonctionnelle a lieu à l'adolescence afin d'optimiser ces comportements à l'âge adulte (Galvan et al., 2006; van Duijvenvoorde et al., 2019). Les trois modèles standard sont présentés dans la Figure 2.



**Figure 2. Modèles neurodéveloppementaux de l'adolescence ; adapté de Shulman et al.(2016)**

Il existe également le modèle triadique, « *Triadic Model* », par Ernst & Fudge (2009). Dans ce modèle, le système socio-émotionnel est dichotomique : un système motivationnel correspondant à des comportements d'approche, sensible aux récompenses et à la prise de risques, qui repose notamment sur le striatum ; et un système émotionnel associé à l'évitement, à l'intensité des réponses, sensible aux stimuli émotionnels aversifs, faisant appel à l'amygdale. Parallèlement, le système de contrôle cognitif, tenu par le cortex préfrontal, constitue le centre régulateur de ces deux sous-systèmes afin de gérer l'approche et l'évitement en réponse à des stimuli.

Ce modèle fournit un schéma dynamique du fonctionnement cérébral, soutenant l'hypothèse que les réponses aux stimuli sont le résultat de l'intégration de ces trois systèmes distincts. Bien que leur fonctionnement se chevauche, les soubassements anatomiques de chacun les définissent, prenant un rôle dominant pour chaque comportement, comme nous l'avons décrit ci-dessus (Ernst et al., 2006; Ernst & Fudge, 2009).

## 1.5. L'entraînement du contrôle inhibiteur

Comme nous l'avons évoqué précédemment, il est établi que l'entraînement cognitif peut influencer les trajectoires développementales selon le niveau de maturation cérébrale (Johnson, 2011; Jolles et al., 2012). Sachant que les effets de l'entraînement nous renseignent sur les possibilités du cerveau en développement, nous nous penchons maintenant sur les effets de l'entraînement du CI durant deux fenêtres développementales, i.e. l'enfance et l'adolescence.

De nombreuses études ont mis en avant les changements plastiques induits par un entraînement exécutif au cours de la vie (Astle et al., 2015; Karbach, 2015; Karbach & Schubert, 2013; Karbach & Unger, 2014; pour une revue récente, voir Tymofiyeva & Gaschler, 2021). Les interventions scolaires (e.g. Blair et al., 2018; Diamond et al., 2007, 2019; Diamond & Lee, 2011; Solomon et al., 2017) ou des programmes informatiques (e.g. Dowsett & Livesey, 2000; Jurigova et al., 2021; Karbach & Unger, 2014; Meyer et al., 2020; Posner et al., 2013) sont à même d'améliorer les compétences exécutives comme le CI, voire d'accélérer le rythme naturel de leur développement. L'efficacité des entraînements dépend non seulement de leur pratique répétée (Thorell et al., 2009), du niveau de motivation (Katz et al., 2014), mais notamment des spécificités individuelles, telles que les événements épigénétiques (Rueda et al., 2005) et la tranche d'âge de l'échantillon (Jaeggi et al., 2014). Ce dernier renvoie à l'idée des périodes sensibles du développement, au cours desquelles la plasticité cérébrale accrue étaye le développement des capacités cognitives, telles que les habiletés d'inhibition (Kleim & Jones, 2008; Kolb & Gibb, 2011). En effet, la réceptivité aux expériences rejoint le développement cérébral (Huttenlocher, 2002; Kolb & Gibb, 2011), induisant des changements structurels, cognitifs et comportementaux importants (Knudsen, 2004). Considérant les fenêtres plastiques, les résultats d'un entraînement au CI peuvent être d'autant plus marqués (Tymofiyeva & Gaschler, 2021). Deux périodes du développement, l'enfance et l'adolescence, sont particulièrement sensibles aux niveaux cérébral et cognitif pour accueillir une intervention exécutive.

### 1.5.1. Enfance

Le développement du CI au cours des années préscolaires reflète des changements dans le CPF (pour une vue d'ensemble sur la maturation du CPF, voir Kolk & Rakic, 2022). Ces changements témoignent de son potentiel neuroplastique pendant l'enfance, ce qui rappelle à nouveau le rôle de l'environnement sur les réorganisations fonctionnelles qui s'y opèrent, interagissant avec le développement cognitif. Le rôle du milieu peut être positif ou négatif, comme lorsqu'une exposition prolongée à un stimulus aversif, tel la maltraitance, engendre des compétences inhibitrices plus faibles dans plusieurs aspects, comme l'échec scolaire et les difficultés socio-affectives (Pears et al., 2010).

Les activités ciblant les compétences exécutives peuvent être bénéfiques pour le parcours académique des enfants et compenser des retards entraînés par des pathologies ou des milieux défavorisés (Gagne & Saudino, 2010; Groot et al., 2004; Lozano Gutiérrez & Ostrosky, 2012). C'est le cas du programme *Tools of the Mind* pour les enfants en école maternelle, qui a pour but d'entraîner les FE, notamment le CI, tout en favorisant le comportement prosocial, les aptitudes interpersonnelles et les compétences scolaires (Diamond et al., 2007). Dans un essai contrôlé randomisé à grande échelle, comprenant un suivi en première année, Blair et al. (2018) ont indiqué l'amélioration de l'autorégulation, la réduction des troubles de comportement et le renforcement des relations positives entre les enseignants et les enfants dans le groupe expérimental, en comparaison au groupe contrôle. De plus, des progrès ont été rapportés en vocabulaire et mathématiques, les bénéfices académiques étant encore plus importants l'année suivante, lorsque l'avancée en lecture est devenue manifeste. Les auteurs soulignent également que ces effets ont été environ huit fois plus importants dans les écoles à faibles revenus (Blair et al., 2018). Dans une autre étude, les enfants ayant suivi ce programme ont exhibé des progrès plus importants sur les mesures de CI en comparaison à ceux ayant eu une intervention basée sur le jeu, qui ne cible pas l'autorégulation sous-tendue par l'inhibition (Solomon et al., 2017). Par ailleurs, ce résultat a été plus marqué chez les enfants présentant des symptômes de TDAH (Solomon et al., 2017). En effet, l'entraînement ciblant le CI est également employé dans le développement atypique. Meyer et al. (2020) ont proposé un entraînement basé sur une version modifiée de la tâche Stop Signal chez les enfants atteints de TDAH, âgés de 8 à 11 ans. Les participants se sont

entraînés pendant au moins cinq jours par semaine, environ 15 minutes par jour, pendant 4 semaines. Le protocole a inclus un groupe contrôle d'enfants présentant un TDAH dont l'entraînement était non adaptatif, i.e. les temps des stimuli ne s'adaptent pas à la performance du sujet. Les résultats ont signalé une diminution de la puissance relative des ondes thêta dans l'EEG au repos, ce qui peut représenter un mécanisme neuronal qui témoigne de l'impact du CI sur l'inattention. En outre, les auteurs ont relevé une tendance à l'atténuation des signes d'inattention uniquement dans le groupe expérimental, d'après l'évaluation des parents.

De manière générale, la littérature avance que les enfants présentant des difficultés sont ceux qui bénéficient le plus d'un entraînement exécutif (pour une méta-analyse, voir Scionti et al., 2020). Cela est le cas pour les enfants issus des milieux défavorisés, ainsi que ceux ayant des pathologies, comme le TDAH, où l'entraînement du CI peut atténuer l'expression clinique des symptômes et le décalage par rapport à des compétences inhibitrices plus proches de la norme (e.g. Benzing & Schmidt, 2019; DAVIS et al., 2015; Meyer et al., 2020). Il est donc important de retenir que les programmes éducatifs ciblant le CI sont à même de réduire les facteurs de risques psychologiques et d'échec scolaire ultérieurs (Blair & Raver, 2014). Les effets positifs concernent aussi les enfants typiques, comme l'indiquent les améliorations observées par Diamond et al. (2019) en lecture, écriture, maîtrise de soi et régulation attentionnelle dans la vie quotidienne, mettant en évidence un transfert des compétences acquises vers le monde réel.

L'entraînement exécutif serait-il plus propice pour les enfants d'âge préscolaire, plus jeunes, que pour les enfants plus âgés ? Deux méta-analyses révèlent que l'entraînement exécutif est aussi efficace chez les enfants plus jeunes que chez les enfants plus âgés (Kassai et al., 2019; Scionti et al., 2020), mais attirent l'attention aux spécificités développementales des FE. Précisément, les FE présentent une plus grande unité pendant les premières années de vie (Wiebe et al., 2011), mais se diversifient au fur et à mesure (Friedman & Miyake, 2017; Karr et al., 2018). Il peut donc être difficile de cibler le CI chez les enfants plus jeunes, étant donné que les capacités inhibitrices ne seraient pas facilement séparables d'autres compétences exécutives, comme la mise à jour en MdT (Klauer et al., 2010). Par conséquent, les effets de transfert peuvent être plus importants chez les enfants d'âge préscolaire en raison du chevauchement des habiletés exécutives (Scionti et al., 2020). Cependant, un entraînement ciblé sur le CI peut être davantage bénéfique chez des enfants entre 8 et 12 ans

que chez ceux entre 4-5 ans (Diamond & Lee, 2011b). D'autres études ont démontré que l'entraînement au CI peut améliorer les capacités inhibitrices dès l'âge de 3 ans (Dowsett & Livesey, 2000).

Delalande et al. (2020) ont exploré les résultats cognitifs et anatomiques d'un entraînement au CI chez les enfants et les adolescents par rapport à un groupe contrôle. Chez les enfants entre 9 et 10 ans, une amélioration significative des scores de Stroop a été rapportée chez les garçons uniquement ; aucun progrès cognitif n'a été constaté chez les adolescents entre 16 et 17 ans . De plus, des changements plastiques touchant l'épaisseur et la surface corticale dans plusieurs sous-régions du CPF, telles que les GFI, témoignent des effets de l'entraînement spécifiques à l'âge et au sexe des individus. Bien que cette étude présente des résultats préliminaires, non-corrigés pour les comparaisons multiples, les conclusions soulèvent l'impact de l'entraînement du CI sur les fenêtres plastiques du développement, ainsi que les effets de genre.

Liu et al. (2015) ont évalué les effets d'un entraînement au CI chez les enfants d'âge préscolaire par le biais d'un jeu sur tablette, nommé « Fruit Ninja » – un jeu disponible dans le commerce, conçu par Halfbrick Studios – à raison de 15 minutes par jour, quatre jours par semaine, pendant trois semaines. Le jeu représente un go/noGo ludique, dans lequel deux types de stimuli – un fruit ou une bombe – s'affichent de manière aléatoire. Les participants ont reçu la consigne de répondre uniquement aux fruits (stimuli "go") et d'inhiber leurs réponses aux bombes (stimuli "noGo"). Les effets de cet entraînement ont été comparés à celui d'un groupe de contrôle actif, qui a réalisé des jeux de coloriage sur tablette pendant 10 minutes par jour, deux jours par semaine, au cours de trois semaines. En comparant les résultats obtenus pré et post intervention entre les deux groupes, les auteurs ont signalé l'absence de progrès dans les scores à une tâche de Go/noGo, ce qu'ils justifient par la sensibilité relativement faible des données comportementales. Cependant, des changements au niveau neuronal induits par l'entraînement ont été rapportés lors de cette tâche. Plus précisément, cet entraînement a induit des modifications de l'activité cérébrale durant le go/noGo chez le groupe expérimental, et ce seulement chez les filles, comme l'indique une augmentation significative du potentiel N2 central en comparaison au groupe contrôle. Cet effet corrobore le rôle capital de la maturation individuelle dans les résultats d'un entraînement cognitif, ainsi que les différences de genre dans le pattern de maturation cérébrale (De Bellis et al., 2001).

Effectivement, le genre semble jouer un rôle dans les capacités inhibitrices, mais cela ne fait pas consensus. Dans une méta-analyse rassemblant plus de 20 000 enfants de 1 à 9 ans, les filles ont présenté de meilleures capacités inhibitrices que les garçons dans des tâches de délai de gratification (Silverman, 2021). Cela fait écho aux arguments de Bjorklund & Kipp (1996) sur la capacité des femmes à mieux supprimer les réponses inadaptées en comparaison aux hommes. Néanmoins, cette interaction entre le CI et le genre n'est pas observée dans d'autres études sur le CI (Bellaj et al., 2016; Galambos et al., 2005).

### **1.5.2. Adolescence**

Caractérisée par des changements importants s'opérant à plusieurs niveaux, tels que physiologique, psychologique, culturel et social, l'adolescence marque la période clef entre l'enfance et l'âge adulte. Par la suite, nous mettons en avant les éléments qui soutiennent la place de l'adolescence en tant que fenêtre d'opportunités pour une intervention ciblée, en particulier pour le CI.

En tant que fenêtre plastique tardive, l'adolescence a un potentiel pour le développement des compétences cognitives (Blakemore & Mills, 2014; Casey et al., 2008; Karbach, 2015). Compte tenu de ce potentiel, des études ont proposé aux adolescents un entraînement au CI par le biais de différents types d'interventions, comme les jeux vidéo (Boendermaker et al., 2017), les programmes d'interface ludique (Delalande et al., 2020; Salvia et al., 2019), les exercices de créativité axés sur des exemples restrictifs ou expansifs (Agogué et al., 2014; Agogué et al., 2014b; Cassotti et al., 2016; Ezzat et al., 2019), les activités adaptées au milieu scolaire (Beauchamp et al., 2019) ou des pratiques diverses comme la méditation de pleine conscience (Bogels et al., 2008; Kiani et al., 2017; Oberle et al., 2012; Sanger & Dorjee, 2015; Yuan et al., 2020). Cependant, en comparaison aux enfants et aux adultes, la littérature sur l'entraînement au CI chez les adolescents est encore à ses débuts (Beauchamp et al., 2019).



Plusieurs études ont démontré que la progression la plus marquée du CI se produit pendant l'enfance, même si son développement se poursuit pendant l'adolescence (Luna et al., 2004). Or, il convient de noter que face à des récompenses imminentes, les capacités inhibitrices s'améliorent à l'adolescence en se rapprochant du niveau des adultes, comme le démontrent les performances à la tâche d'anti-saccade (Constantinidis & Luna, 2019; Geier & Luna, 2012). Cela reflète la capacité à mobiliser des ressources exécutives dans le but de recevoir une récompense (Geier et al., 2010), ce qui corrobore la place prégnante de la motivation chez ce public. Compte tenu de ces aspects pendant l'adolescence, l'entraînement des capacités inhibitrices doit tenir compte d'éléments dont l'importance est fondamentale à cette période, notamment la présence de pairs, la prise de risque et la gestion des récompenses sociales (Bouhours et al., 2021b; Defoe et al., 2020; Habib et al., 2015; Kolb & Gibb, 2011; Osmont et al., 2017, 2021). Dans ce sens, Beauchamp et al. (2019) ont étudié les changements cognitifs et neuronaux suscités par un entraînement au CI chez des adolescents recrutés en milieu scolaire précaire, âgés de 15 à 17 ans, en comparaison à un groupe de contrôle actif. Dans cette étude, la tâche Stop Signal a été modifiée pour inclure de visages d'adolescents dans la phase de repérage de chaque essai, i.e. la phase où le participant doit indiquer la direction de la flèche affichée à l'écran. Cette modification tient compte de la place privilégiée des pairs durant cette période de la vie, notamment en ce qui concerne la prise de risque (Chein et al., 2011). Parallèlement, le groupe de contrôle actif s'est entraîné sur une tâche similaire, mais sans le bip marquant les essais de stop. Les deux groupes ont réalisé leurs entraînements respectifs au lycée, à raison de 10 à 14 séances sur une période de quatre à cinq semaines. Les stimuli modifiés ont été également employés dans les tests appliqués avant et après l'intervention, i.e. Go/noGo et Stop Signal. Ces deux tâches ont été présentées en IRM fonctionnelle, mais seule la première a constitué la mesure comportementale. Les résultats indiquent une divergence entre les données comportementales et neurales en réponse à l'entraînement au CI. En effet, l'amélioration des capacités inhibitrices avant et après l'entraînement au CI suit la direction attendue, mais n'atteint pas le seuil de significativité par rapport au groupe de contrôle actif. Par ailleurs, le groupe de contrôle actif a présenté des diminutions de l'activation au fil du temps dans les régions occipitales et temporales, celles-ci souvent impliquées dans l'attention visuelle. Inversement, l'activation dans ces régions a été maintenue chez les participants entraînés au CI, suggérant que ce

groupe a peut-être maintenu leur attention plus longtemps sur la tâche. Cela indique que l'entraînement peut affecter le CI via un mécanisme attentionnel.

Hatfield et al. (2018) soulignent également le nombre limité d'études sur l'entraînement au CI chez les adolescents. Dans une recherche chez les jeunes conducteurs, âgés d'environ 18 ans (âge moyen), ces auteurs ont examiné les effets d'un entraînement au CI basé sur une tâche de type Go/Nogo, une tâche Stop Signal et une tâche de détection des collisions. La conduite dans un simulateur a été également évaluée. La conception de cet entraînement a tenu compte des paramètres optimaux rapportés dans la littérature, tels que l'adaptation du niveau de difficulté en fonction de la performance (Benikos et al., 2013). Des tâches similaires, mais sans la consigne d'arrêt des réponses, ont constitué l'entraînement du groupe contrôle. Ainsi, les participants ont suivi cinq jours d'entraînement, avec un retour sur leurs performances durant l'entraînement. Au sein du groupe entraîné au CI, les performances sur les tâches entraînées ont progressé après l'intervention, mais aucune amélioration significative sur la conduite n'a été observée entre le premier et le dernier jour d'évaluation. De plus, aucune mesure n'a présenté une interaction significative entre le jour d'entraînement et le groupe d'attribution.

L'adolescence étant ainsi une période de réactivité accrue aux récompenses et au contexte social, l'entraînement du CI pendant l'adolescence peut être plus ardu s'il n'intègre des aspects sociales, émotionnels et motivationnels, comme l'accentuent les interventions peu ou pas efficaces chez ce public (Beauchamp et al., 2019; Delalande et al., 2020).

Pour conclure, afin de comprendre pourquoi l'adolescence constitue une période propice à l'entraînement du CI, nous passerons en revue les principaux facteurs contribuant pour que cette période soit aussi bien une fenêtre de vulnérabilités que d'opportunités.

De nombreuses études montrent que la matière grise et la matière blanche cérébrales subissent des changements dynamiques durant l'adolescence. Précisément, le volume de matière grise diminue lors de l'adolescence jusqu'au début de l'âge adulte ; la plupart des régions affichent ainsi une trajectoire en forme de U inversé (Casey et al., 2008; Giedd, 2009; Shaw et al., 2008). Ce dynamisme présente des différences régionales de rythme et de maturation (Mills et al., 2014). Gogtay et al. (2004) ont rapporté une diminution de matière grise touchant d'abord les aires sensorimotrices primaires, ensuite le CPF dorsolatéral et le

CPF temporal latéral, ce qui corrobore le pattern postéro-antérieur de la maturation cérébrale. Contrairement à la matière grise, la matière blanche augmente de manière relativement linéaire au cours du lifespan, reflétant possiblement la myélinisation neuronale continue (Casey et al., 2008; Gogtay et al., 2004). La vulnérabilité de l'adolescence évoque des anomalies ou des exagérations dans ces processus maturationnels typiques, interagissant avec des éléments psychosociaux, tels que les relations sociales, le stress et la privation de sommeil (Diamond, 2013; Paus et al., 2008). Au niveau cérébral, un élagage synaptique excessif ou une plasticité synaptique anormale instaurent un terrain fécond pour le développement des troubles psychiatriques à début précoce comme la schizophrénie (Barch, 2005; Tau & Peterson, 2010). Des expressions pathologiques peuvent également survenir d'un amincissement cortical plus accéléré ou plus étendu que le développement cérébral courant (Kolk & Rakic, 2022; Thompson et al., 2001). Parallèlement, les individus souffrant de TDAH peuvent présenter un retard de maturation corticale (Shaw et al., 2007). De même, comme la maturation des systèmes frontaux à l'adolescence permet le raffinement du contrôle cognitif (Casey et al., 2008; Luna, 2009; Luna et al., 2015), il est cohérent que des troubles caractérisés par des altérations exécutives débute à l'adolescence car le recrutement de cette région peut faire émerger des anomalies qui y sont peut-être présentes depuis longtemps (Millan et al., 2012). Il est donc essentiel de tenir compte du parcours développemental cérébral et non seulement de l'état définitif des structures (Giedd et al., 1999).

Au niveau génétique, l'adolescence fait intervenir le gène DCC (Netrin-1, et son récepteur, le DCC), qui orchestre la mise en place des connexions neuronales dopaminergiques dans le CPF médian (Reynolds et al., 2018; Vosberg et al., 2020). Chez la souris, le DCC guide l'expansion des voies mésocorticolimbiques, en particulier dopaminergiques, pendant l'adolescence (Flores, 2011). La littérature indique que ce fonctionnement est similaire chez l'humain, les détournements étant associés à la dépression, à la schizophrénie et à la toxicomanie (Vosberg et al., 2020). En effet, les altérations dans les axones dopaminergiques au sein du CPF médian entraînent des conséquences sur son développement structurel et fonctionnel pendant l'adolescence. Par exemple, Manitt et al. (2013) avancent que le DCC était suractivé dans le cerveau d'adolescents ayant commis un suicide dans le cadre d'une dépression majeure. Cela évoque également le rôle des expériences personnelles sur l'activité du gène DCC (Reynolds et al., 2018). Précisément,

l'exposition aux stimuli nocifs, tels que les drogues ou le stress chronique, modifie l'expression des récepteurs de DCC dans les neurones dopaminergiques ; en conséquence, cela compromet l'activité du CPF médian (Reynolds & Flores, 2021). Inversement, l'exposition à des expériences positives peut susciter des adaptations opportunes au développement cognitif (Vosberg et al., 2020).

### **1.5.3. Effets de transfert**

Le transfert peut être défini comme une réutilisation des stratégies précédemment apprises sur une tâche non entraînée, qu'elle présente un construit similaire à la tâche employée, i.e. transfert proche ; ou non, i.e. transfert lointain (Karch & Unger, 2014a; Nokes, 2009). Il est bien connu que les effets de transfert ne sont pas facilement observables (Berkman et al., 2014; Green et al., 2014). Cette absence d'effet évoque la dite « malédiction de la spécificité » (Green & Bavelier, 2008a) indiquant que les avantages d'un entraînement reçu ne se manifestent que peu, voire pas, dans une activité nouvelle – et ce, indépendamment du progrès obtenu durant l'entraînement. De même, les tâches exécutives étant cognitivement coûteuses, l'épuisement cognitif (Muraven & Baumeister, 2000) peut causer la diminution des performances en fonction du temps investi (Holtzer et al., 2011).

En ce qui concerne le transfert proche ou lointain, l'entraînement au CI n'est pas toujours prometteur (Berkman et al., 2014; Thorell et al., 2009). Par exemple, Klingberg (2010) argumente que le transfert à partir des tâches de MdT reflète la confluence des réseaux neuronaux préfrontaux qui soutiennent la MdT et l'intelligence fluide. Il se pourrait donc que le transfert lointain des FE concerne surtout la MdT, et plus modérément le CI, en raison du construit même de cette habileté, permettant ainsi de garder en mémoire et de mettre à jour les compétences apprises (Friedman et al., 2006). Thorell et al. (2009) confirment cela chez l'enfant d'âge préscolaire, pour qui le transfert lointain vers les tâches attentionnelles n'a pas été observé après l'entraînement au CI, mais à la suite d'un entraînement à la MdT. D'autres points sont également susceptibles de contraindre les effets de transfert du CI, tels que le choix des tâches inhibitrices sans tenir compte des différentes composantes (Zhao et al.,

2015), ainsi que le niveau de difficulté de ces tâches (Wass, 2015), la courte durée de l'entraînement et la tranche d'âge de l'échantillon (Diamond & Lee, 2011b).

A l'encontre de ces arguments, Rueda et al. (2005) ont constaté un effet de transfert lointain sur les matrices d'intelligence fluide après un entraînement global, comprenant des tâches de CI et d'attention visuo-spatiale sur cinq sessions chez les enfants entre 4 et 6 ans. Malgré cela, aucun transfert proche n'a été constaté sur l'ANT. Chez les enfants de 6 à 8 ans, Yuan et al. (2020) ont constaté un transfert vers une tâche de MdT à la suite d'un entraînement sur l'inhibition des réponses et de l'interférence, ainsi qu'un transfert lointain sur les matrices d'intelligence fluide après l'entraînement à l'inhibition de l'interférence. Ces résultats suggèrent la considération d'un construit multidimensionnel du CI.

Le critère écologique des interventions est mis en avant afin de faciliter le transfert des compétences. Effectivement, les interventions ayant une approche écologique s'intègrent plus facilement au quotidien des participants, présentant donc plus de chances de se généraliser à des contextes réels similaires (Bryck & Fisher, 2012; Green et al., 2014). Chez les enfants, les *serious games* représentent un moyen d'entraîner les compétences inhibitrices et de favoriser le transfert proche et lointain. Par exemple, un programme d'entraînement de sept jours basé sur un jeu appelé « *Wesley says* » (i.e. « Jacques a dit ») chez des enfants de 8 à 12 ans a suscité une amélioration des performances sur la tâche Go/noGo, mesurant l'inhibition des réponses, mais pas sur la tâche de Stroop, qui évalue l'inhibition de l'interférence (Zhao et al., 2015). En outre, une étude récente a montré que les puzzles comprenant une contradiction logique sont à même d'améliorer l'inhibition des réponses chez les adultes, mais pas l'inhibition de l'interférence (Leong et al., 2022).

Chez les enfants souffrant de TDAH, Crepaldi et al. (2020) annoncent des résultats encourageants sur l'impulsivité par le biais du jeu Antonyms qui entraîne le CI (Crepaldi et al., 2020b). De même, le programme informatique « *Captain log* », rapporte des transferts proches (La Marca & O'Connor, 2016) et des transferts lointains (Rabiner et al., 2010), avec une amélioration marquée des compétences exécutives et scolaires, comme la lecture. Ces résultats ont été corroborés par l'amélioration des symptômes d'inattention et d'impulsivité via un programme d'entraînement avec un neurofeedback nommé « *Play attention* » (Steiner et al., 2014), dont les bénéfices se sont maintenus six mois après. De plus, les jeux peuvent

également entraîner le CI afin d'améliorer la prise de conscience alimentaire chez les adolescents obèses (Staiano et al., 2012).

Les incohérences sur les effets de transfert rapportées par la littérature relèvent aussi d'autres facteurs, tels que le temps d'entraînement (Jaeggi et al., 2008), les différences interindividuelles de réceptivité à l'entraînement (Jaeggi et al., 2011, 2014), ainsi que l'approche statistique utilisée pour mesurer l'effet de transfert potentiel (Noack et al., 2014). Sur ce dernier, la plupart des études sur l'entraînement cognitif emploient l'Analyse de la Variance (ANOVA) ou des modèles linéaires pour estimer les effets de transfert. Or, ces approches se heurtent à des défis intrinsèques, voire des limitations, tels que la dissociation des changements attribués à la fonction cognitive entraînée de celles non entraînées ; le test simultané de variables éventuellement corrélées formant un ensemble complexe ; et la complexité inhérente de données longitudinales (Noack et al., 2014). De plus, dans le cadre de l'entraînement des FE, il n'est pas établi que ces modèles tiennent compte de l'unité et la diversité des FE, i.e. l'entraînement d'une FE, e.g. le CI, peut ne pas être totalement indépendant des changements d'autres FE, e.g. la MdT.

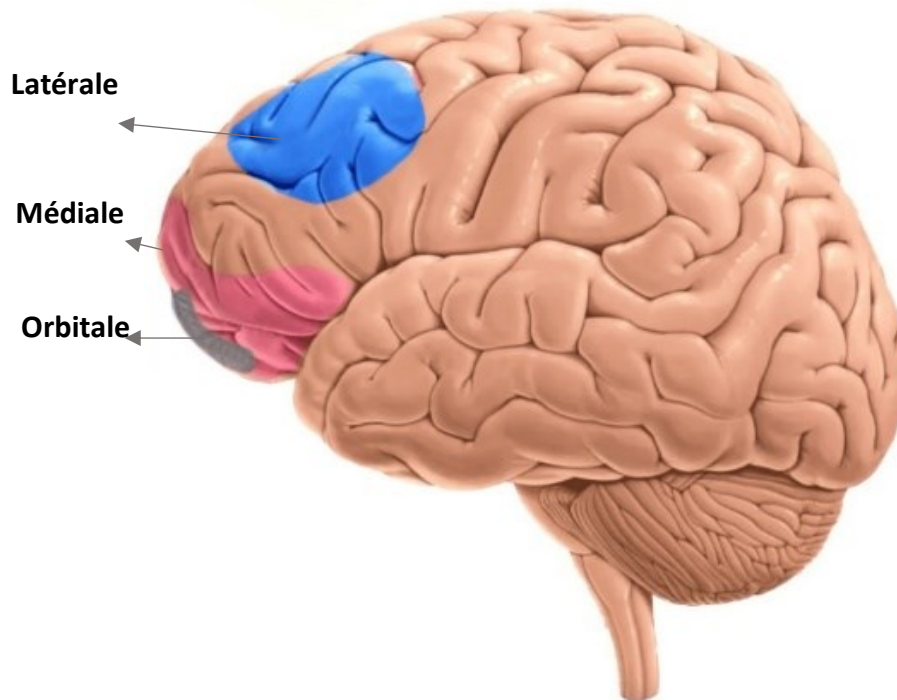
Face à ce défi, des approches plus dynamiques gagnent en popularité, comme les modèles des scores latents de changement (Latent Change score, souvent abrégés LCS, Kievit et al., 2018), un outil de la Modélisation par équations structurelles (Structural equation modeling, souvent abrégée SEM). La SEM réalise l'estimation simultanée de relations multiples entre les variables, permettant aussi de préciser des directions dans les relations qui font office des voies causales hypothétiques. De même, le LCS constitue un outil populaire d'analyse dans la recherche longitudinale. Il évalue de manière dynamique la différence d'une variable dans deux points de mesure ou plus, au lieu d'étudier les changements dans l'ordre temporel (Castro-Schilo & Grimm, 2018). De ce fait, les différences entre les mesures successives sont modélisées en tant que facteurs de changement latents. Le LCS peut alors rendre compte des questions critiques soulevées par les études sur l'entraînement, les effets de transfert y compris, comme le constat selon lequel les personnes ayant de bonnes performances dans un domaine (e.g. le vocabulaire) sont plus à même à progresser dans un autre domaine (e.g. le raisonnement logique) et inversement (Kievit et al., 2017).

## **1.6. Caractérisation multi-niveau du contrôle inhibiteur**

Le CI a été étudié à plusieurs niveaux, tel que le niveau cognitif, physiologique et cérébral. Dans cette thèse, nous allons nous approfondir sur chacun de ces trois niveaux afin de les combiner par la suite, proposant donc une vision aussi bien ciblée que globale du CI.

### **1.6.1. Niveau cérébral**

De très nombreuses études ont mis en avant le rôle fondamental du cortex préfrontal (CPF) dans les FE (Alvarez & Emory, 2006; Houdé et al., 2010; Kane & Engle, 2002; Zhang et al., 2017), et en particulier le CI (Aron, 2007; Aron et al., 2014; Criaud & Boulinguez, 2013). Le CPF joue un rôle clef dans l'exécution des fonctions les plus complexes du cerveau humain, telles que la fixation d'objectifs, la planification pour les atteindre, l'évaluation des conséquences, ainsi que la résistance aux distracteurs qui peuvent compromettre ce processus (José et al., 2020). Couvrant les zones 8–13, 24, 32, 44-47 de la carte cytoarchitecturale de Brodmann (BA) chez le primate, le CPF présente trois sous-régions – à savoir orbitale, médiale et latérale (Figure 3) – chacune ayant démontré sa spécificité fonctionnelle par des connexions avec une large gamme des structures corticales et sous-corticales (Fuster, 2001).



**Figure 3. Sous-régions du cortex préfrontal.** Adapté de Salehinejad et al. (2021)

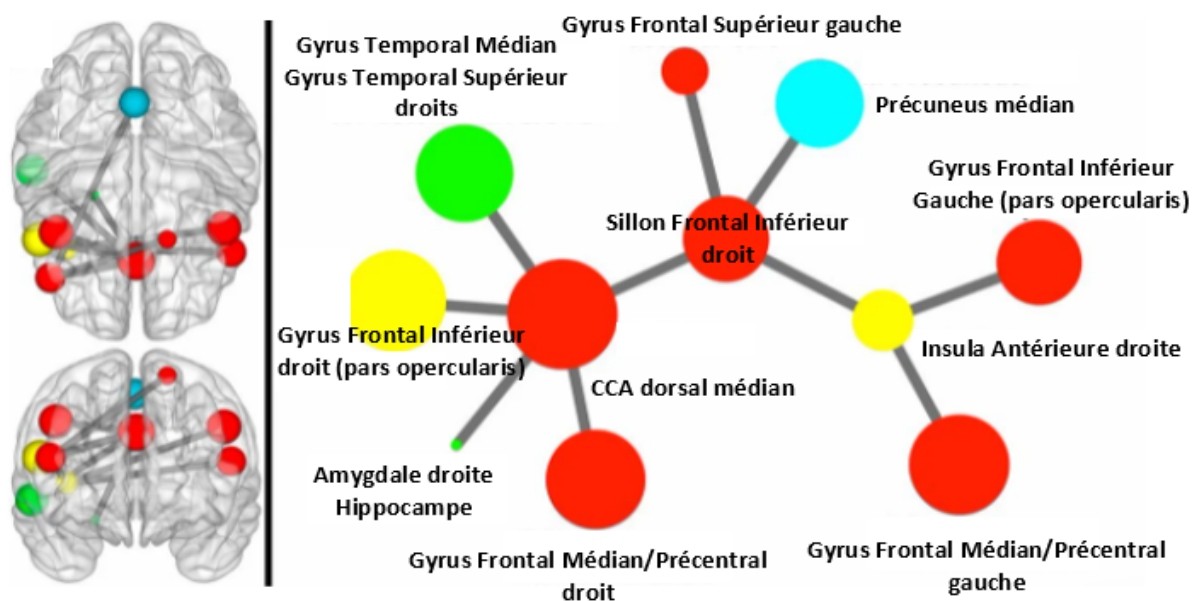
Le CPF est en effet connecté avec différentes régions corticales, le tronc cérébral, le thalamus, les ganglions de la base et le système limbique (Fuster, 1991, 2001). Cette particularité anatomique pourrait expliquer les régions activées lors de tâches sollicitant le CI, incluant un réseau cortico-sous-cortical (Aron, 2007; Aron et al., 2003, 2007, 2014a; Maizey et al., 2020). Dans une revue récente, Jones et Graff-Radford (2021) indiquent que le CPF latéral ventral est impliqué dans l'inhibition des réponses et la surveillance des conflits ; le CPF médian soutient la motivation et la régulation émotionnelle, celle-ci faisant appel aux habiletés inhibitrices ; le cortex orbitofrontal est associé à l'inhibition et au raisonnement émotionnel et social.

Les activations les plus récurrentes du CI concernent le Cortex Cingulaire Antérieur (CCA ; Botvinick et al., 2004; Braver et al., 2001; Bush, 2011; Bush et al., 2000; Carter et al., 2000; Zhang et al., 2017), le Gyrus Frontal Inférieur (GFI ; Aron, 2007; Aron et al., 2003, 2007, 2014; Hartwigsen et al., 2019; Maizey et al., 2020), l'insula (Cai et al., 2014; Leong et al., 2018), l'aire pré-motrice et motrice supplémentaire (Cai et al., 2012; Maizey et al., 2020; Wang et al., 2019), le cortex pariétal (Hannah & Jana, 2019; Kolodny et al., 2017, 2020; Maizey et al., 2020) et les ganglions de la base, qui regroupent le noyau caudé, le putamen, le pallidum, le noyau



sous-thalamique et la substance noire (Bhaijiwala et al., 2014; Mink, 2003; Mink, 1996, 2018). D'autres régions sont également impliquées dans le réseau du CI, telles que le CPF dorsolatéral (Goghari & MacDonald, 2009; Leong et al., 2018) et le cortex moteur (Langner et al., 2018; Picton et al., 2007). En outre, le striatum ventral, l'hippocampe et l'amygdale sont activés dans la retenue de l'action par le biais de la connectivité fonctionnelle accrue avec entre les ganglions de la base et le système limbique (Wang et al., 2016). Cela dit, de nombreuses régions participent aux capacités inhibitrices en raison des connexions avec l'une des structures précédemment mentionnées.

Spielberg et al. (2015) ont par ailleurs avancé que les profils de connectivité cérébrale globale en jeu dans le CI changent selon le niveau de demande d'inhibition, i.e. essais incongruents et essais congruents. Par le biais d'une analyse en réseau, ils ont observé une communication en réseau plus importante face aux demandes complexes, ainsi qu'une robustesse plus marquée (Figure 4).



**Figure 4. Réseau présentant les structures impliquées dans le CI et leur couplage plus important lorsque la demande d'inhibition est élevée par rapport à une demande faible. La couleur de la sphère représente l'appartenance à un réseau ; la taille de la sphère évoque la force du nœud ; la couleur du cercle représente l'appartenance au module ; adapté de Spielberg et al. (2015)**

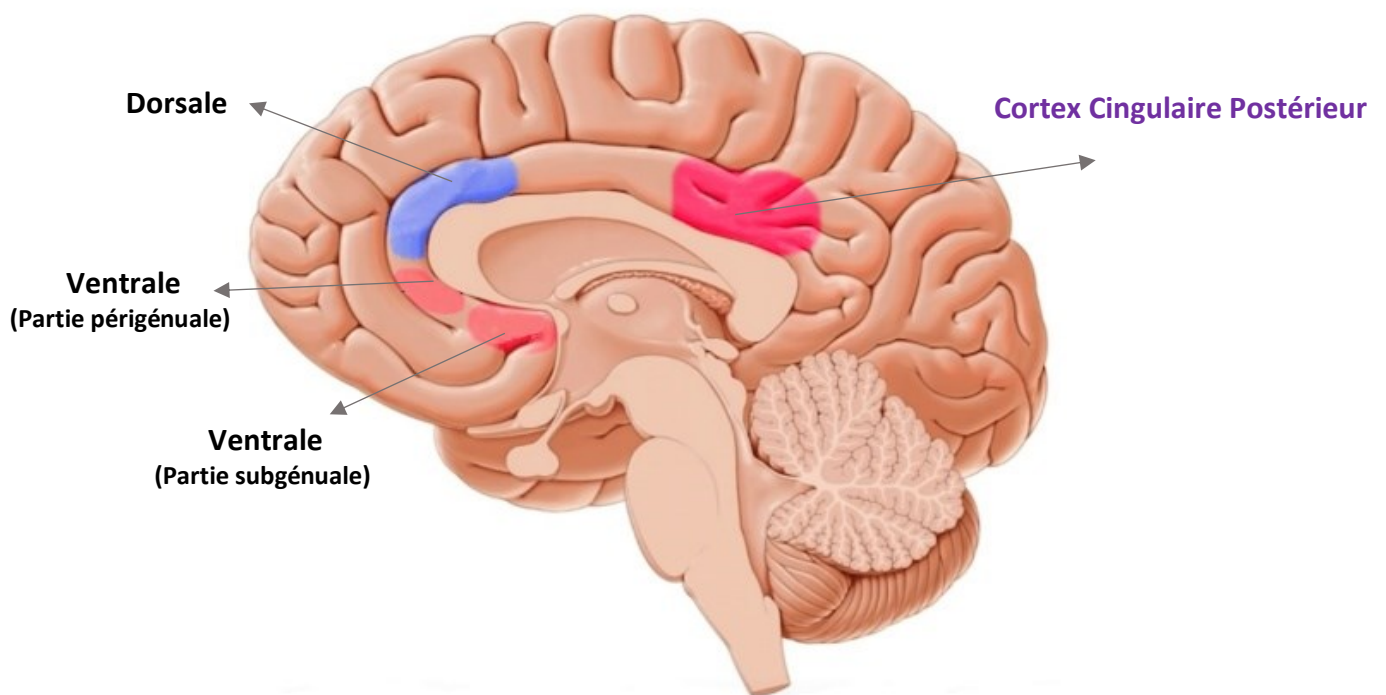
Nous présentons dans ce qui suit le rôle fonctionnel précis des principaux nœuds du réseau cérébral du CI : le cortex cingulaire antérieur, le gyrus frontal inférieur et les structures sous-corticales, telles que l'insula, les ganglions de la base et l'amygdale.

#### **1.6.1.1. Le cortex cingulaire antérieur (CCA)**

Les processus exécutifs sont classiquement associés à l'activité du CCA (aire de Brodmann 23-24, 31-32 et régions environnantes), qui se localise sur la surface frontale médiane contiguë au corps calleux (Carter et al., 1999; Gasquoine, 2013). De nombreuses connexions relient le CCA à l'ensemble du cerveau, notamment les zones préfrontales, pariétales, temporales et le cortex enthorinal dorsolatéral ; des connexions efférentes se projettent vers le système moteur, à savoir l'aire motrice supplémentaire, pré-motrice et motrice ; il reçoit également des projections de l'amygdale, une région clef du système limbique (Carter et al., 1999).

Le rôle exécutif du CCA et les diverses connexions précédemment citées sous-tendent les approches qui lui attribuent à la fois une part émotionnelle, motrice et cognitive (Bush et al., 2000; Heilbronner & Hayden, 2016). Etkin et al. (2011), par exemple, mettent l'accent sur l'identité limbique du CCA, plus précisément son implication dans le traitement émotionnel, spécialement vis-à-vis de la peur, l'anxiété et la douleur, chez l'humain et l'animal. Cette vision élargit la dichotomie classique du CCA – dorsale-caudale et ventrale-rostrale (Figure 5), qui attribue à chaque sous-partie une spécialisation cognitive et affective, respectivement (Bush et al., 2000; Salehinejad et al., 2021). En contrepartie, Petersen and Posner (2012) soulignent que le CCA serait activé lors des processus engageant principalement l'attention focalisée. Les auteurs interprètent en faveur de cette théorie l'ensemble d'opérations qui activent le CCA, telles que la perception de la douleur, la gestion des récompenses, le traitement des conflits et la détection d'erreurs. D'autres études s'accordent sur la part de la détection des erreurs et le traitement des conflits, notamment dans la section dorsale du CCA (Botvinick et al., 2004; Carter & Veen, 2007; Gasquoine, 2013; Heilbronner & Hayden, 2016; Paus, 2001). Ces trois approches se réconcilient sur une vision plus intégrative selon laquelle le CCA sous-tend à la

fois la détection des erreurs, la gestion des conflits et la sélection des réponses en employant des ressources attentionnelles et émotionnelles, celles-ci enregistrées comme des signaux aversifs, i.e. de valence négative (Botvinick, 2007; Braem et al., 2017; Dreisbach & Fischer, 2015; Shenhav et al., 2013, 2016).



**Figure 5. Sous-régions du cortex cingulaire antérieur et le cortex cingulaire postérieur.** Adapté de Salehinejad et al. (2021)

Dans un article résumant les principales fonctions attribuées au CCA dorsal, Ebitz & Hayden (2016) ont comparé la gestion du conflit cognitif, le rôle de prise de décision, soutenu par des recherches à Oxford (e.g. Kolling et al., 2016), et la théorie sur la valeur attendue du contrôle, avancée par les études de Princeton (e.g. Shenhav et al., 2016). Pour Kolling et al. (2016), l'activité de la portion dorsale du CCA est sensible aux choix de valeurs. Selon cette théorie, le CCA dorsal gère les informations associées aux choix proposés, nécessaires à la flexibilité mentale, et signale les occurrences d'erreur et de récompense afin de décider du

maintien ou du changement de comportement. Parallèlement, du point de vue avancé par Shenhav et al. (2016), le CCA dorsal joue un rôle central dans les décisions concernant l'allocation du contrôle cognitif à travers une analyse des coûts et des bénéfices. Cette théorie regroupe donc les postulats sur le rôle exécutif du CCA dorsal et celui de la prise de décision basée sur la récompense.

Au-delà de ce débat encore d'actualité, diverses études en neuroimagerie ont rapporté des activations du CCA durant les tâches qui sollicitent le CI (Alvarez & Emory, 2006; Bush et al., 2000; Dreisbach & Fischer, 2015; Petersen & Posner, 2012, entre autres), comme le Stroop (Stroop, 1935). Dans un article princeps, Pardo et al. (1990) observent via la Tomographie à Emission des Positons (TEP) une activation robuste du CCA en comparaison à d'autres zones cérébrales durant un test classique de Stroop. En outre, Swick et Jovanovic (2002) proposent trois versions différentes du Stroop à deux patients ayant des lésions distinctes du CCA afin de faire ressortir des spécificités anatomo-fonctionnels de cette structure à l'aide de l'IRMf. Les auteurs concluent que des lésions touchant la portion médiodorsale du CCA, mais pas celles de la portion médio-rostrale, entraînent des déficits de précision du CI dans les essais incongruents. Cela permet l'association de la part dorsale du CCA à l'inhibition d'automatismes. De surcroît, Banich (2019) décompose l'effet Stroop en une cascade de réponses qui engage plusieurs régions cérébrales, dont le CCA qui intervient tardivement en sélectionnant la réponse par rapport au conflit détecté. Selon l'auteur, le CPF dorsolatéral traite les informations du Stroop en mémoire de travail et les envoie vers les régions plus postérieures et dorsales du CCA, qui met en place la sélection de la réponse appropriée et l'inhibition des celles non-pertinentes. Ensuite, les régions rostrales du CCA se chargent d'évaluer l'adéquation de la réponse vis-à-vis du conflit repéré (Jahn et al., 2014). Ce pattern de sélection des réponses et traitement des conflits est retrouvé de manière plus ou moins similaire dans d'autres tâches classiques du CI, comme la tâche Stop Signal (Brockett et al., 2020; Brown & Braver, 2005) et Simon (Kerns, 2006; Simon & Small, 1969).

### 1.6.1.2. Le gyrus frontal inférieur (GFI)

Le GFI, également appelé cortex ventrolatéral, est un gyrus trifolié qui se trouve dans le lobe frontal du cortex cérébral, placé au-dessous du sillon frontal inférieur (Chikazoe, 2010; Swick et al., 2008). Chaque foliole constitue une sous-division gyrale (Figure 6), à savoir une partie operculaire (pars opercularis, BA 44), une partie triangulaire (pars triangularis, BA 45-47) et une partie orbitaire (pars orbitalis, BA 10) (Greenlee et al., 2007). La partie operculaire est localisée en avant de l'opercule frontal, délimitée dans la partie supérieure par le sillon frontal inférieur ; la partie triangulaire s'apparente à un triangle situé entre les rameaux vertical et horizontal de Sylvius ; la partie orbitaire se trouve devant le rameau horizontal de Sylvius, en haut du sillon orbitaire (Démonet & Planton, 2012; Tatu, 2011). Dans l'hémisphère gauche, ce même gyrus correspond à l'aire de Broca, une structure capitale dans le traitement langagier, sollicitant la mémoire de travail verbale (Rogalsky et al., 2008).

Élément sous droit, diffusion non autorisée

**Figure 6. Sous-parties du gyrus frontal inférieur.**

De nombreuses études ont avancé le rôle primordial du GFI droit dans l'inhibition de la réponse motrice, souvent couplé à l'aire pré-motrice (Aron et al., 2003, 2004, 2014a; Forstmann et al., 2008; Suda et al., 2020). Le CI moteur semble recruter notamment la pars triangularis et la pars opercularis (Aron et al., 2003, 2004, 2016), comme l'indiquent les déficits de performance à la Stop Signal Task (SST, Logan & Cowan, 1984) des patients ayant des lésions dans ces aires. Chambers et al. (2006) ont démontré que la désactivation temporaire de la partie operculaire du GFI droit par stimulation magnétique transcrânienne impacte la capacité de freiner une action déjà entamée, tout en préservant la capacité d'exécuter des réponses. Récemment, Fujiyama et al. (2022) ont observé que la stimulation de ces aires par la technique de stimulation transcrânienne à courant direct entraîne l'amélioration de performances inhibitrices chez les personnes âgées et jeunes adultes dans une tâche de prise de décision intégrée à la SST. Parallèlement, la pars orbitalis serait plutôt associée à la mémoire de travail lors des processus de récupération d'informations sémantiques (Démonet & Planton, 2012).

Par le biais de la morphométrie cérébrale basée sur voxels (VBM) et l'IRM fonctionnelle, Wang et al. (2016) ont dissocié les composantes de retrait et de retenue de la réponse, appelées inhibition réactive et proactive, respectivement. Les auteurs indiquent que le réseau de l'inhibition réactive englobe le GFI droit, aire motrice supplémentaire, le cortex orbitofrontal et le striatum ; l'inhibition proactive recrute le GFI droit (voir aussi Cai et al., 2016; Smittenaar et al., 2013; White et al., 2014), l'hippocampe, l'amygdale, le striatum ventral, ainsi que les aires prélimbique et infralimbique du CPF. L'accent est mis sur la corrélation entre le CI réussi et la connectivité fonctionnelle entre le GFI et l'aire motrice supplémentaire. De même, la performance au CI est inversement associée au volume de matière grise du GFI droit. Cela répond au gradient maturationnel postéro-antérieur du cerveau, caractérisé par l'élagage synaptique et l'amincissement cortical de l'enfance à l'âge adulte qui s'accompagne de l'amélioration des performances inhibitrices avec le temps (Casey et al., 2005; Casey et al., 2000; Hermans et al., 2017).

Le CI présente des spécificités selon sa localisation dans chaque sous-partie du cortex frontal inférieur (CFI), qui rassemble la partie operculaire et la partie triangulaire du GFI, ainsi que le sillon précentral et jonction frontale inférieure (Suda et al., 2020). Par exemple, la région ventrale du CFI est engagée dans la mise à jour des plans d'action, permettant le

freinage face à un signal d'arrêt ou la reprogrammation de la réponse lors d'un Go/noGo (Aron et al., 2014b). En revanche, la partie dorsale est recrutée lors de la détection des saillances dans l'environnement qui sont à même d'influencer le comportement en cours, comme un signal d'arrêt (Wessel & Aron, 2014).

Certaines recherches incluent le GFI gauche dans le réseau d'inhibition de la réponse (Swick et al., 2008; Swick & Chatham, 2014), indiquant une augmentation des erreurs de commission lors d'un Go/NoGo chez les patients qui présentent une lésion dans cette région. Selon Swick et al. (2008), l'intégrité du GFI gauche est nécessaire pour l'efficacité du CI. Ce constat est critiqué par plusieurs études soutenant que son rôle dans le CI est moins critique que celui de son homologue droit (Aron et al., 2003, 2004, 2014a, 2014b).

En parallèle, certains auteurs argumentent que le GFI ne soutiendrait pas uniquement l'inhibition des réponses, mais serait plutôt impliqué dans l'attention exécutive (Erika-Florence et al., 2014; Hampshire et al., 2010). Dans son étude en neuroimagerie en employant une version adaptée de la SST, Hampshire et al. (2010) observent que le GFI droit s'active lorsque des stimuli sont repérés, qu'ils soient suivis d'une réponse motrice, de l'inhibition de celle-ci ou de l'absence de réponse. Cela renforce le postulat de l'attention exécutive, notamment en raison de l'activation du GFI au cours des trois tâches de contrôle dont la part du CI était minimale. Ces résultats s'opposent à ceux retrouvés par Rubia et al. (2003), qui reportent l'activation spécifique du GFI droit sur une tâche également basée sur la SST, uniquement lorsque le CI est engagé. Aron et al. (2014b) concluent que le GFI droit demeure le lieu critique pour l'inhibition de la réponse motrice dans le CPF, bien qu'il intègre un réseau plus vaste, intervenant dans le contrôle exécutif en général.

### **1.6.1.3. Les structures sous-corticales**

Le réseau du CI comprend non seulement le CPF, mais également des structures sous-corticales, qui assurent son intégrité (Kelly et al., 2004), telles que les ganglions de la base (e.g. Aron et al., 2007), le noyau caudé et le putamen (e.g. Casey et al., 1997), comme le signalent des déficits inhibiteurs dans diverses pathologies touchant l'activité de ces régions. De même, des anomalies dans l'amygdale (Depue et al., 2014) ont été reportées en lien avec les capacités

inhibitrices. De par ses connexions avec le CCA, l'insula est souvent associée à la détection des signaux saillants lors des tâches classiques d'inhibition, comme la tâche Stop Signal (Cai et al., 2014). Dans les sections suivantes, nous présentons en détail ces structures en lien avec le CI.

#### 1.6.1.3.1. *Insula*

L'insula est une structure localisée sous le sillon latéral, enveloppée par les opercules frontal, temporal et pariétal dans chaque hémisphère. Elle se présente sous forme de pyramide inversée (Figure 7) et couvre environ 2 % de la surface corticale (Boucher et al., 2017). La partie antérieure de l'insula possède de nombreuses connexions avec les régions frontales et temporales, ainsi que le gyrus cingulaire antérieur (Ghaziri et al., 2017), soutenant un réseau attentionnel qui permet de relayer l'information pertinente et saillante aux aires corticales à même d'engager un contrôle top-down (Boucher et al., 2017). En contrepartie, la stimulation de l'insula postérieure est souvent associée à l'intéroception et à l'activité somato-sensorielle (Kurth et al., 2010). Plusieurs études ont distingué des patterns anatomo-fonctionnels spécifiques pour l'insula antérieure et postérieure, droite et gauche (Augustine, 1996; Boucher et al., 2017; Ghaziri et al., 2017; Kurth et al., 2010).

Élément sous droit, diffusion non autorisée

**Figure 7. L'insula.**



Dans une méta-analyse sur les zones du cortex fronto-operculaire engagées par le CI, Cai et al. (2014) mettent en avant l'insula antérieure droite, dont l'activité s'accorde avec le cortex frontal inférieur. Les auteurs concluent que l'insula antérieure droite joue un rôle particulièrement important dans la détection des stimuli saillants, comme lors des signaux « stop » durant la tâche Stop Signal. Cette opération s'avère essentielle pour permettre la mise en œuvre du CI, celui-ci sous-tendu par des structures comme le GFI.

Parallèlement, l'insula antérieure s'active lors des tâches dites de gambling et jeux de hasard, qui mesurent également le CI (Boucher et al., 2017). Plus précisément, Levin et al. (2012) soulignent l'activité couplée du CPF ventrolatéral, de l'amygdale et de l'insula antérieure dans ces opérations, notamment lorsque des pertes sont impliquées. Leong et al. (2018) ajoutent que l'activité conjointe du CPF ventrolatéral droit et de l'insula antérieure droite a pu prédire une inhibition réussie dans les paris proposant un gain élevé.

#### *1.6.1.3.2. Ganglions de la base et structures environnantes*

Les ganglions de la base, ou noyaux gris centraux, comprennent des structures situées dans la partie interne des hémisphères cérébraux (Figure 8), à savoir le striatum, le noyau caudé, le putamen et le globus pallidus ; les noyaux apparentés désignent des structures comme le noyau sous-thalamique, localisé dans le diencephale, ou encore la substantia nigra, présente dans le mésencéphale (Lanciego et al., 2012).

**Figure 8. Les ganglions de la base et les structures environnantes.**

Les ganglions de la base entretiennent un rôle exécutif, contribuent au contrôle moteur et sont des médiateurs des réponses dans le réseau de la récompense, tout cela grâce aux connexions avec les régions corticales frontales (Haber, 2016). Ils influencent la mise en place et l'efficacité du CI (Forstmann et al., 2012; Hazy et al., 2007) à travers les signaux provenant de trois voies mobilisées principalement dans l'hémisphère droit (Maizey et al., 2020). Premièrement, l'exécution d'une réponse face à un stimulus sollicite la voie fronto-striatale-pallidale, dite directe (Maizey et al., 2020). Afin de bloquer la réponse, la voie indirecte et la voie hyperdirecte sont recrutées. La voie indirecte inclut des projections vers le striatum et le globus pallidus avant d'atteindre le noyau sous-thalamique, qui détient le rôle de hub décisionnel dans les programmes moteurs (Alves dos Santos & Mallet, 2013), permettant une rétention tonique de la réponse, i.e. l'inhibition proactive (Aron, 2011; Aron et al., 2007). En compensation, la suppression des réponses se fait plus rapidement à travers la voie hyperdirecte, qui innerve directement le noyau sous-thalamique et permet l'exécution de l'inhibition réactive (Aron, 2011; Aron et al., 2007; Aron & Poldrack, 2006), toutes ces activations étant notamment étudiées durant la tâche Stop Signal.

Malgré le débat concernant la place de ces voies dans le CI, il est globalement accepté que le GFI et l'aire motrice supplémentaire exercent une influence sur les ganglions de la base dans la gestion des actions et l'inhibition des réponses motrices (Aron et al., 2007; Aron & Poldrack, 2006; Maizey et al., 2020).

#### *1.6.1.3.3. Amygdale*

L'amygdale est un complexe de treize sous-noyaux situés dans le lobe temporal médian, divisés en trois groupes qui se distinguent selon leur cytoarchitecture, myéloarchitecture et chimioarchitecture (Amunts et al., 2005), à savoir le groupe basolatéral, le corticomédian et le centro-antérieur. D'autres noyaux interagissent avec cet ensemble, comme la zone amygdalo-hippocampale.

L'amygdale présente de nombreuses connexions afférentes et efférentes avec les régions corticales, frontales et préfrontales, avec les ganglions de la base, entre autres (Amunts et al., 2005). Ces connexions posent la base structurelle pour diverses habiletés cognitives auxquelles l'amygdale participe, comme la mémoire, l'apprentissage et les processus émotionnels (Phelps, 2004).

L'apport émotionnel semble être le rôle clef de cette structure, dont le fonctionnement exerce une influence la prise de décision et l'inhibition des réponses (Ernst et al., 2019). Levin et al. (2012) signalent que l'amygdale déclenche la peur face à l'incertitude de la décision dans une tâche de paris risqués ; cette réaction sollicite ensuite le CPF ventrolatéral en jouant un rôle de médiateur de la réponse. L'émotion est donc intégrée dans la délibération de la décision afin que celle-ci soit plus prudente et avantageuse, d'où le rôle critique de l'amygdale dans les processus exécutifs, notamment le CI (Bechara et al., 1999; Levin et al., 2012; Vogt et al., 1992). De plus, dans un paradigme de récompenses, Ernst et al. (2019) ont rapporté une activation plus faible de l'amygdale et un engagement accru du noyau accumbens chez les adolescents en comparaison aux adultes. Les auteurs indiquent que schéma pourrait expliquer la propension à prendre des risques durant l'adolescence, étant donné le rôle atténué de l'amygdale en tant que médiateur de la réponse.

Parallèlement, Wang et al. (2016) avancent que l'amygdale, l'hippocampe, le cortex préfrontal infralimbique, prélimbique et le striatum ventral sont inclus dans le réseau de rétention des réponses, dit réseau d'attente ; celui-ci contraste avec le réseau d'arrêt qui comprend le GFI droit, l'aire motrice supplémentaire et le striatum dorsal. Ces deux systèmes correspondent aux bases neurales de la distinction entre les FE chaudes et froides, respectivement (Wang et al., 2016; Zelazo & Carlson, 2012).

### **1.6.2. Aspects neurodéveloppementaux**

Il est su que la maturation cérébrale sous-tend l'affinement des processus cognitifs, e.g. l'élagage synaptique améliore progressivement le contrôle cognitif ; la myélinisation augmente la vitesse de la transmission neuronale, ce qui favorise l'activité conjointe de plusieurs régions afin de maîtriser le comportement de manière optimale (Luna & Sweeney, 2004). Considérant que le développement cognitif et la maturation du cerveau entretiennent des liens étroits, la distinction entre les contraintes précoces et les contraintes cérébrales tardives semble être capitale pour mieux comprendre le rôle des aspects anatomiques sur le CI. Ainsi, une distinction importante doit être posée : celle des marqueurs trait et état qui influencent l'efficacité du CI. Ces marqueurs sont des caractéristiques neurodéveloppementales qui vont soit se constituer in utero et demeurer stables au cours de la vie – facteurs qualitatifs appelés « trait » ; soit varier en réponse aux changements neuroplastiques durant le développement, tels que la maturation, l'apprentissage et les expériences personnelles – facteurs quantitatifs dits « état » (Cachia et al., 2016).

#### **1.6.2.1. Contraintes précoces, marqueurs qualitatifs – trait**

De nombreuses recherches reconnaissent l'impact des processus neurodéveloppementaux prénataux sur la cognition et le comportement dans le développement typique (Raznahan et al., 2012; Walhovd et al., 2012) et atypique (Mueser et al., 2001; Schlotz & Phillips, 2009).

Les plis corticaux sont des marqueurs précoces du développement cérébral (Cachia et al., 2021a). En effet, dès la dixième semaine de vie fœtale, le cortex commence à se plisser dans un processus appelé gyrification, en constituant des gyri qui correspondent aux montagnes du relief cortical, et des sillons, les vallées (Habas et al., 2012). Les mécanismes sous-tendant la gyrification chez chaque individu sont encore peu connus (Sun et al., 2012), ce qui soutient une variabilité interindividuelle importante pour la trajectoire, la forme et l'étendue de certains plis (Ono et al., 1990). Durant la gestation, les plis primaires varient peu parmi les individus, apparaissant durant les premières semaines ; ils sont suivis des plis secondaires, qui présentent une variabilité modérée ; les plis tertiaires surviennent plus tardivement et varient de manière notable inter et intraindividuellement (Armstrong et al., 1995). Au troisième trimestre gestationnel, le cortex in utero se présente comme une structure très plissée et complexe qui ressemble déjà au cortex adulte ; durant l'enfance et l'adolescence, la complexité corticale augmente dans les zones préfrontales, s'accompagnant des processus de réorganisation synaptique qui reflètent le gradient postéro-antérieur de la maturation cérébrale (Mangin et al., 2010).

Contrairement aux caractéristiques quantitatives qui changent durant le développement, telles que l'épaisseur ou la surface corticale (Giedd & Rapoport, 2010), la forme, l'étendue et le type de sillons sont des attributs qui restent pratiquement inchangés tout au long de la vie (Cachia et al., 2016; Leonard et al., 2009; Mangin et al., 2015; Ono et al., 1990), appelés ainsi marqueurs trait. Etant témoins du développement cérébral précoce (Welker, 1990), ces marqueurs trait peuvent subir des déviations dans certains troubles qui présentent des atteintes cognitives, notamment l'autisme (Nordahl et al., 2007), le trouble bipolaire (Fornito et al., 2007) et la schizophrénie (Wisco et al., 2007). Sur cette dernière, une quantité importante du CPF se trouve enfouie et plissée chez les patients atteints de schizophrénie chronique, chez ceux ayant présenté un premier épisode psychotique, ainsi que chez des frères et sœurs sains et encore des sujets à haut risque de développer cette pathologie (Cachia et al., 2021b; Yücel et al., 2003). Cela suggère que le plissement atypique du CPF peut constituer un marqueur de vulnérabilité à la schizophrénie. De plus, la présence d'hallucinations chez les personnes schizophrènes (Cachia et al., 2008; Garrison et al., 2015; Rollins et al., 2020) reflète aussi certaines caractéristiques des plis corticaux. Par exemple, les patients subissant un premier épisode de schizophrénie exhibent une réduction de l'asymétrie de la longueur du sillon latéral (Hoff et al., 1992). Il est également su que le schéma des plis

représente un marqueur phénotypique du développement cérébral global et un indice de la maturation fonctionnelle (Habas et al., 2012).

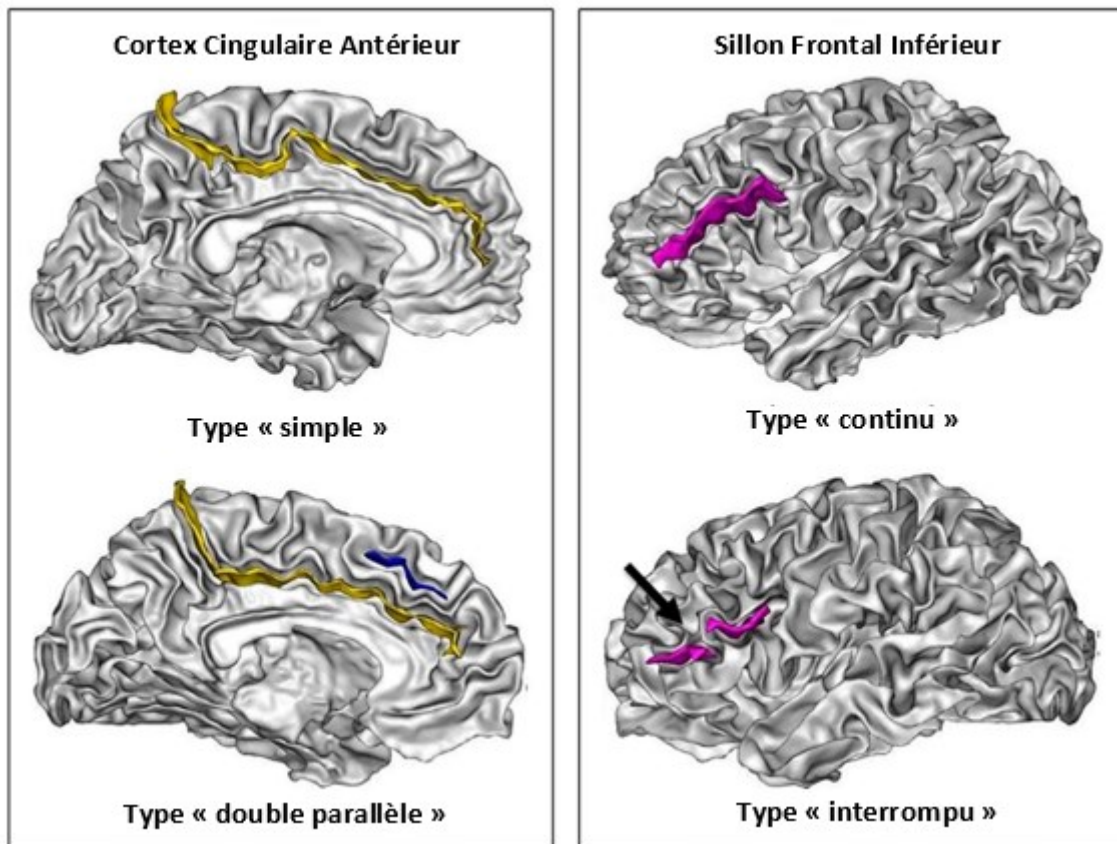
Par ailleurs, la forme des sillons s'avère être un prédicteur des capacités cognitives à travers le développement, comme le CI (Borst et al., 2014; Cachia et al., 2014, 2016; Mangin et al., 2010). Parmi les sillons influençant l'efficacité du CI, le sillon paracingulaire (SPC), qui s'étend au-dessus du CCA, est d'importance particulière. Leonard et al. (2009) distinguent différents motifs de ce sillon, basés sur la classification d'Ono et al. (1990) dissociant la présence ou l'absence du SPC, c'est-à-dire des motifs simples et doubles parallèles, respectivement. La concordance des motifs dans chaque hémisphère constitue un motif dit symétrique, alors que des motifs hétérogènes correspondent à un pattern asymétrique. La stabilité de ces motifs au cours du développement a été établie empiriquement démontrée (Chi et al., 1977; Hill et al., 2010; Tissier et al., 2018). Par exemple, Cachia et al. (2016) ont corroboré cette stabilité en analysant des données longitudinales d'imagerie d'individus entre 7 et 32 ans.

Fornito et al. (2004) ont étudié le lien entre les tâches exécutives et les motifs sulcaux du CCA chez les adultes. Les résultats indiquent que les participants ayant des motifs asymétriques présentent de meilleurs scores en général que ceux caractérisés par des motifs symétriques. Cachia et al. (2014) ont démontré que l'efficacité du CI sur une tâche de Stroop Animal (Wright et al., 2003) est directement associée au schéma sulcal du CCA. Spécifiquement, les enfants de 5 ans présentant des motifs asymétriques du CCA ont été plus performants que ceux ayant des motifs symétriques, et ce en considérant à la fois le score d'interférence et le nombre d'erreurs. En contrepartie, cette différence n'est pas retenue dans les tâches sollicitant la MdT verbale, comme l'empan numérique à l'endroit et à l'envers, ce qui suggère un rôle spécifique des motifs sulcaux sur les capacités inhibitrices dans la gestion du conflit. Borst et al. (2014) valident ces résultats en comparant la performance des enfants de 5 et 9 ans qui effectuent respectivement le Stroop Animal et Stroop classique. En effet, les participants qui possèdent des motifs asymétriques du CCA sont plus performants que ceux caractérisés par des motifs symétriques. En outre, les marqueurs quantitatifs du CCA, tels que l'épaisseur et la surface, ne rendent pas aussi bien compte de l'efficacité du CI durant l'enfance que les motifs sulcaux, ce qui renforce leur importance en tant que marqueurs précoces et stables du développement. Tissier et al. (2018) ont également comparé des enfants et des adultes sur les scores d'interférence au Stroop classique selon les motifs sulcaux. En

conformité avec les conclusions précédentes, les sujets ayant des motifs asymétriques du CCA sont moins impactés par l'interférence que ceux possédant des motifs symétriques, et cela indépendamment de l'âge.

Le lien entre le CI et les motifs sulcaux du CCA peut également être modulé par l'environnement, qu'il soit prénatal (ex. présence ou non d'une grossesse gémellaire, Amiez et al., 2018) ou après la naissance (ex. bilinguisme, Cachia et al., 2017; Del Maschio et al., 2019). Plus précisément, dans la tâche Flankers (Eriksen & Eriksen, 1974), les bilingues présentant une asymétrie gauche du CCA, i.e. la présence du SPC dans l'hémisphère gauche, sont moins performants que les bilingues ayant des motifs symétriques, alors que l'inverse se produit chez les monolingues (Cachia et al., 2017), ce pattern d'asymétrie gauche étant plus fréquent chez la population en général (Yücel et al., 2001). De plus, les bilingues possédant des motifs symétriques sont plus efficaces que les monolingues d'asymétrie gauche lors de la deuxième session de la tâche, ce qui évoque une adaptation optimale du traitement des conflits cognitifs par le CCA, peut-être en raison des expériences des conflits linguistiques au cours de la vie (Abutalebi et al., 2012; Cachia et al., 2017).

Bien que moins célèbre que le motif sulcal du CCA, le sillon frontal inférieur (SFI) est aussi associé à l'efficacité du CI. Le SFI est situé sur la face externe du lobe frontal, parallèle au sillon frontal supérieur, limitant le GFI (Tissier et al., 2018). Il se présente soit de manière continue sans interruption, le type « continu », soit avec une lacune plus ou moins marquée, le type « interrompu » (Destrieux et al., 2010). Les motifs du SFI sont symétriques s'ils sont identiques dans les deux hémisphères, et asymétriques s'ils sont divergents (Figure 9). Comme les motifs sulcaux du CCA, Tissier et al. (2018) mettent en exergue que les enfants et les adultes possédant des motifs asymétriques du SFI ont des temps de réponse au Stroop classique plus rapides que leurs pairs ayant des motifs symétriques.



**Figure 9. Motifs sulcaux du CCA et du SFI ; adapté de Tissier et al. (2018)**

#### **1.6.2.2. Contraintes tardives, marqueurs quantitatifs – état**

Comme nous l'avons précédemment exposé, l'IRM fonctionnelle a permis de déceler diverses régions du CPF qui interviennent dans les processus d'inhibition (Aron, 2007; Aron et al., 2004; Bush et al., 2000). Ces régions constituent également des références pour les études en IRM anatomique afin d'explorer les changements corticaux quantitatifs, dits marqueurs état, tels que l'épaisseur corticale (Delalande et al., 2020; Newman et al., 2016; Weise et al., 2019; Westlye et al., 2011), la surface corticale (Delalande et al., 2020; Migliorini et al., 2015; Takeuchi et al., 2015) et le volume de matière grise (Takeuchi et al., 2015).



Chez l'homme, la surface et l'épaisseur du cortex sont génétiquement indépendantes (Panizzon et al., 2009) et présentent des trajectoires développementales propres (Raznahan et al., 2011) sous-tendues par des mécanismes neurobiologiques différents (Storsve et al., 2014). Selon l'hypothèse de l'unité radiale (Rakic, 1988), la surface corticale dépend principalement de la génération de colonnes dans le cortex, alors que l'épaisseur repose sur la genèse neuronale à l'intérieur de ces colonnes, le nombre de connexions établies et leur myélinisation. Bien que ces processus se concentrent sur la vie prénatale et périnatale, les changements ultérieurs peuvent survenir des modifications synaptiques, dendritiques et dans les épines (Bhardwaj et al., 2006), associées soit à l'âge ou soit à la stimulation des réseaux par la pratique (Jolles et al., 2012). Parallèlement, le volume de matière grise dépend à la fois de l'épaisseur corticale et de la surface du cortex, reflétant l'augmentation de la taille du cerveau et le plissement du cortex dans les stades précoces du développement, ainsi que l'élagage synaptique et la maturation cérébrale à des périodes plus tardives (Giedd et al., 1999).

La neuroplasticité au cours du développement engendre des changements importants des marqueurs états. Par le biais d'un suivi longitudinal, Shaw et al. (2006) ont démontré que les enfants ayant des scores d'intelligence élevés, mesurés par les échelles de Wechsler, présentent un cortex plus plastique avec une augmentation initiale prolongée de l'épaisseur corticale ; ce rapport s'inverse par la suite, l'amincissement cortical caractérisant de meilleurs scores cognitifs au début de l'adolescence. Ainsi, l'intelligence est associée au pattern de développement cortical, notamment la maturation des régions frontales.

Les changements d'épaisseur corticale peuvent s'expliquer par la prolifération de la myéline au cours de l'enfance, suivie d'un élagage sélectif des synapses en fonction de leur utilisation (Riccomagno & Kolodkin, 2015; Sowell, 2004), ce qui permet de sculpter de manière optimale les réseaux neuronaux sous-tendant les fonctions cognitives, principalement celles de haut-niveau comme le CI (Hensch, 2004; Reh et al., 2020; Shaw et al., 2006). Du fait que le gain d'épaisseur du cortex est plus marqué chez les enfants ayant de meilleurs scores d'intelligence générale, la période sensible pour sculpter des réseaux neuronaux plus efficaces pour la cognition peut être plus longue, donc plus prolifique, pour ces individus (Duncan et al., 2000; Shaw et al., 2006).

Newman et al. (2016) ont étudié le lien entre l'inhibition de la réponse mesurée par une tâche de Go/NoGo et l'épaisseur corticale du GFI dans un échantillon constitué de jeunes adultes typiques et des jeunes atteints de Troubles de l'Attention avec Hyperactivité (TDAH). Les auteurs ont observé une association entre une faible performance au Go/NoGo et une épaisseur corticale plus importante dans le GFI caudal, et ce sans la médiation du statut de TDAH ou des antécédents de consommation de substances illicites, celles-ci souvent associées aux mauvaises capacités d'inhibition (Clark et al., 2007; Faraone et al., 2007). Ce résultat évoque la cohérence entre la trajectoire développementale de l'inhibition de la réponse et l'amincissement cortical. En effet, les capacités d'inhibition de la réponse progressent linéairement de l'enfance à l'âge adulte, les jeunes adultes étant plus efficaces que les adolescents (Aïte et al., 2018; Casey et al., 2005; Luna, 2009; Steinberg, 2010). En parallèle, l'amincissement cortical suit également une trajectoire linéaire jusqu'à l'âge adulte, ce qui le caractérise comme l'un des marqueurs qui subissent le plus l'influence de l'âge (Fjell et al., 2009; Tamnes & Østby, 2018; Vijayakumar et al., 2018).

Considérant le volume cortical, Takeuchi et al. (2012) ont reporté des corrélations entre la réduction du score d'interférence au Stroop chez les adultes, indiquant une performance plus efficace, et l'augmentation du volume régional de matière grise dans le CCA, le GFI droit et le cervelet. Ces observations sont cohérentes avec la littérature. Précisément, l'augmentation du volume du cervelet fait écho aux études qui signalent des activations de cette structure au cours du Stroop (Clark et al., 2020; Peterburs & Desmond, 2016) ainsi que des performances affaiblies à cette tâche en cas de lésion (Gottwald et al., 2003). Fjell et al. (2012) ont également repéré le lien entre la surface du CCA caudal droit et les performances cognitives, notamment celles impliquées dans l'auto-régulation comme le CI. Les chercheurs mettent l'accent sur le caractère développemental de ce rapport, qui est plus marqué chez les jeunes enfants à partir de 4 ans.

### 1.6.2.3. Aspects d'apprentissage

Le lien entre les aspects neurodéveloppementaux et la cognition engendre des points de vue distincts. Premièrement, ce lien est perçu comme unidirectionnel, i.e. les régions cérébrales doivent d'abord atteindre leur maturité pour que les fonctions cognitives sous-jacentes se développent (Johnson, 2011). Inversement, la neuroimagerie et les méthodes neurobiologiques modernes ont fourni des preuves en faveur d'une interaction entre les facteurs génétiques et l'expérience individuelle lors du développement cérébral. En effet, le cerveau ne se développe pas normalement en l'absence d'une signalisation génétique appropriée, et non plus en l'absence d'un environnement adéquat (Stiles, 2008). Par ailleurs, une distinction a été établie par Denney (1984) entre le potentiel non pratiqué d'un individu, i.e. son niveau de performance sans entraînement des capacités en question, et le potentiel optimisé, i.e. le niveau de performance qu'il pourrait atteindre après un entraînement ciblé. Ces deux potentiels progressent avec l'âge, de l'enfance à l'âge adulte, mais l'interaction entre eux indique dans quelle mesure la pratique affecte le progrès. Le rôle de l'environnement y est également considéré. Par exemple, l'intervention cognitive chez les enfants recevant une éducation optimale, convenablement stimulante, se heurte à un « potentiel génétique réalisé » qui est déjà assez important, agrégeant donc moins de valeur ajoutée. En retour, les interventions cognitives bénéficient plus les enfants issus d'un milieu socio-économique appauvri, peu stimulant (Bronfenbrenner & Ceci, 1994; Mackey et al., 2011).

De ce fait, de nombreuses études développementales utilisent des protocoles d'entraînement cognitif afin d'explorer le potentiel du cerveau en développement. Précisément, l'entraînement peut influencer les trajectoires développementales en fonction du type d'entraînement et le niveau de maturation de l'individu. Bien que l'immaturité de la structure cérébrale puisse limiter les résultats de l'entraînement, i.e. le gain maximal possible, elle représente également des avantages en ce qui concerne la plasticité pour l'apprentissage (Jolles et al., 2012).

Dans cette optique, plusieurs études se sont penchées sur les changements neuroplastiques induits par l'entraînement des habiletés cognitives telles que le CI (Delalande et al., 2020; Draganski et al., 2004; Houdé et al., 2010; Jolles et al., 2012; Sung et al., 2021). Diverses régions constituant le réseau d'inhibition y sont évoquées, comme le CPF avec le CCA

et le GFI, l'aire motrice pré-supplémentaire, le cortex pariétal, les ganglions de la base et le striatum. Lee et al. (2019) ont évalué chez des collégiens la relation entre l'entraînement cognitif à multi-composantes, dont le CI, et le volume régional de matière grise. L'étude a révélé une augmentation du volume de matière grise dans le GFI droit pour le groupe ayant suivi l'entraînement pendant six semaines. De plus, le changement relatif de volume a corrélé avec une amélioration de la performance d'inhibition, mesurée par le Stroop. Globalement, il est su que la baisse d'efficacité cognitive et la diminution étendue du volume de matière grise caractérisent le vieillissement normal (Ramanoël et al., 2018; Tisserand et al., 2004). Bien que le degré d'atrophie varie selon les zones cérébrales, les lobes frontal et temporal sont les plus affectés (Fjell et al., 2014)

En outre, l'entraînement du CI chez l'adulte peut fournir des résultats distincts concernant la connectivité structurelle et fonctionnelle. Par exemple, des améliorations comportementales engendrées par l'entraînement au CI s'accompagnent à la fois d'une diminution de l'activité neuronale dans la pars opercularis et la pars triangularis du GFI droit, et dans la pars orbitalis du GFI gauche durant essais d'inhibition de la tâche Go/NoGo, ainsi que d'une augmentation du volume de la matière grise dans la pars orbitalis droite (Chavan et al., 2015). L'augmentation de la connectivité structurelle à la suite d'un entraînement au CI est souvent relevée dans la littérature, à l'exemple d'un entraînement sur cinq semaines à la tâche de Stroop qui est associé à une amélioration des performances d'inhibition et une augmentation de la connectivité entre le réseau cingulo-operculaire, le cervelet et le cortex visuel primaire (Hu et al., 2017). De ce fait, l'intégrité du volume de matière grise, l'augmentation de ce volume et de la connectivité structurelle sont fortement associées à de bonnes capacités inhibitrices (Berkman et al., 2014; Draganski et al., 2004; Hu et al., 2017; Spierer et al., 2013; Tisserand et al., 2004).

L'entraînement des capacités inhibitrices chez les enfants couvre souvent une période sensible pour le développement des fonctions de haut-niveau, elles-mêmes sollicitant le CI, telle que l'attention exécutive dont le progrès se fait de manière importante entre 3 et 7 ans (Rueda et al., 2004). A la suite d'un entraînement à l'attention exécutive pendant 5 jours, Rueda et al. (2005) ont observé des améliorations à la tâche Attentional Network Task (ANT) et de meilleurs scores d'intelligence générale chez les enfants de 4 à 6 ans. Ces résultats vont

dans le sens d'une baisse des difficultés pour la gestion du conflit cognitif, recrutant le réseau du CCA et les aires pariétales.

Chez les enfants plus âgés, Sung et al. (2021) ont constaté que le volume régional de matière grise dans plusieurs zones du lobe frontal corrèle négativement avec les scores à l'Advanced Test of Attention (ATA), qui évalue l'attention soutenue, sélective et comportant des mesures d'impulsivité comportementale. Autrement dit, plus les enfants exhibent des capacités attentionnelles efficaces, moindre est le volume régional de matière grise dans zones frontales. Par la suite, ces corrélations s'inversent et deviennent positives chez les participants adolescents, suggérant que les habiletés cognitives sous-tendues par les réseaux attentionnels dans le lobe frontal s'améliorent significativement pendant la fin de l'enfance et se stabilisent à l'adolescence. De surcroît, Delalande et al. (2020) ont rapporté une amélioration des scores de Stroop et Stop Signal chez les enfants de 9 ans en comparaison aux adolescents de 16 ans, et uniquement chez les garçons, après un entraînement au CI sur 5 semaines. Cela s'accompagne des changements dans l'épaisseur corticale et dans la surface corticale, corroborant les spécificités neuroplastiques dépendantes de l'âge et du genre durant la maturation cérébrale. Bien que les résultats de ces deux études récentes (Delalande et al., 2020; Sung et al., 2021) ne soient pas corrigés pour des comparaisons multiples, ils mettent en lumière le dynamisme des marqueurs état. En effet, les études longitudinales chez les enfants et adolescents au développement typique ont fait part de ce dynamisme, en indiquant des trajectoires en U inversé pour les volumes de matière grise, dont le pic volumétrique est atteint à différents moments du lifespan selon la région corticale (Giedd & Rapoport, 2010) et le sexe de l'individu (Lenroot et al., 2007). Dans l'ensemble, la correspondance entre les changements structurels survenus pendant le développement et ceux induits par l'entraînement cognitif suggère que l'entraînement cognitif fait appel aux processus neuroplastiques en cours pendant le développement (Delalande et al., 2020). Dans ce cas, l'entraînement au CI peut activer des mécanismes neurodéveloppementaux et moduler les réseaux cérébraux (Jolles et al., 2012).

### 1.6.3. Aspects génétiques

Les facteurs génétiques jouent un rôle critique dans les capacités inhibitrices (Diamond, 2011; Ridderinkhof et al., 2004), notamment par le biais du système dopaminergique, celui-ci étant très présent dans le CPF (Ott & Nieder, 2019) et dans les régions sous-corticales (Conn et al., 2020). En effet, l'activité dopaminergique dépend en partie des polymorphismes de simples nucléotides (en anglais *Single-Nucleotide Polymorphism*, SNP) qui affectent sélectivement les niveaux de dopamine (Brocki et al., 2009; Diamond et al., 2004; Tunbridge et al., 2019), influençant donc le contrôle cognitif, dont le CI (Beu et al., 2019; Cools et al., 2007; Fallon et al., 2019; Nieoullon & Coquerel, 2003). En outre, la dopamine participe également à la physiopathologie de diverses conditions psychiatriques relevant des déficits du CI, telles que le TDAH (Cornish et al., 2005; Kollins et al., 2008) et la schizophrénie (Conn et al., 2020; Eisenberg & Berman, 2010).

Précisément, les SNP constituent des variations génétiques dans lesquelles deux chromosomes diffèrent sur un segment donné par une seule paire de bases. Il existe au moins 10 millions de SNP dans le génome humain, qui se produisent approximativement toutes les 100 à 300 paires de bases, la fréquence des allèles étant supérieure à 1 % (Robert & Pelletier, 2018). Cela les place comme le type de polymorphisme le plus courant dans le génome (Malkki & Petersdorf, 2012). Bien que les polymorphismes génétiques fréquents aient de faibles effets isolés sur le fonctionnement cognitif, ils peuvent expliquer collectivement une grande partie de la variance reportée (Bodmer & Bonilla, 2008). De même, il est difficile de faire des attributions causales dans les études comportementales impliquant la génétique, notamment en raison de la part jouée par le milieu et le contexte historique (Madole & Harden, 2022). Cependant, ces études permettent d'approfondir la compréhension des sources de la variabilité interindividuelle, pouvant influencer l'élaboration d'interventions plus ciblées.

Parmi les SNPs impliqués dans cette voie reliant le système dopaminergique aux capacités cognitives, nous mettons l'accent sur quelques gènes dont l'effet sur le CI est largement documenté : le gène COMT (Diamond et al., 2004; Kasparbauer et al., 2015; Nieratschker et al., 2015; Zmigrod & Robbins, 2021) s'occupant de la dégradation de la dopamine au niveau de l'espace synaptique, les gènes DRD1 et DRD2 codant respectivement

pour les récepteurs dopaminergiques D1 et D2 (Klaus et al., 2019; Tsang et al., 2015; Zmigrod & Robbins, 2021), ainsi que le gène DAT1 qui code pour le transporteur sélectif de dopamine DAT (Congdon et al., 2008; Söderqvist et al., 2012). Parallèlement, des études neuroépigénétiques soulignent que l'association entre le CI et les gènes cités peut être modulée par des facteurs environnementaux, tels que l'entraînement cognitif (Rueda et al., 2005), des mécanismes épigénétiques (Lewis et al., 2019) ou le stress (Diamond, 2011; Zareyan et al., 2021). De surcroît, ce neurotransmetteur peut moduler la plasticité cérébrale (Thibault et al., 2010), ce qui fournit des pistes sur les différences interindividuelles observées sur la réceptivité aux apprentissages et à l'entraînement cognitif.

Nous détaillons dans la suite les gènes listés ci-dessus, i.e. COMT, DAT1, D1, D2, ainsi que la protéine BDNF, et leurs SNP les plus fréquemment cités dans la littérature. Notre attention se porte notamment sur leur relation avec la cognition, plus précisément le CI.

### **1.6.3.1. Le système dopaminergique**

#### *1.6.3.1.1. COMT*

Catechol-O-méthyltransférase, abrégé COMT, est une enzyme responsable de la dégradation des catécholamines. Le codage de cette enzyme repose sur le gène de même nom, qui se situe au sein du chromosome 22q11. Contrairement à d'autres régions cérébrales qui sollicitent notamment la recapture de la dopamine par DAT, COMT est un important régulateur de la neurotransmission dopaminergique dans le CPF, représentant environ 60 % de la dégradation métabolique de ce neurotransmetteur (Antypa et al., 2013). Ainsi, les polymorphismes de COMT sont à même d'affecter les fonctions cognitives sous-tendues par cette région, comme le CI (Diamond et al., 2004; Zareyan et al., 2021).

Le SNP rs4680, aussi nommée Val158Met, est le polymorphisme de COMT le plus étudié dans la littérature. Il détermine une substitution de la méthionine (Met) par la valine (Val) au codon 158, ce qui donne lieu à trois génotypes : Val/Val, Val/Met et Met/Met (Antypa et al., 2013; He et al., 2020). Comme l'allèle Met présente une activité enzymatique amoindrie en comparaison à celle de l'allèle Val, les individus homozygotes pour l'allèle Val exhibent un

fonctionnement enzymatique 40 % plus marqué dans le CPF dorsolatéral, entraînant une baisse des niveaux de dopamine synaptique dans cette zone (Chen et al., 2004). En contrepartie, la variante Met permet une action prolongée de la dopamine dans l'espace synaptique, ce qui peut influencer son efficacité et rebondir sur l'efficacité exécutive (Reuter et al., 2011). Les hétérozygotes ont un taux intermédiaire activité enzymatique (Padmanabhan & Luna, 2014). Il est globalement accepté que la fonction cognitive préfrontale a un rapport en U inversé avec les niveaux de dopamine, ce qui se traduit par des capacités cognitives optimales à des niveaux intermédiaires de dopamine, ainsi que des habiletés altérées dans les états hypo- et hyperdopaminergiques (Goldman-Rakic et al., 2000).

Dans une étude longitudinale récente, Bowers et al. (2020) ont évalué la relation entre ce polymorphisme de COMT et le développement du CI chez les enfants entre 5 et 10 ans. Les auteurs ont observé que la performance des enfants ayant le génotype Met/Met évolue plus au cours du temps que les porteurs d'allèles hétérozygotes (Val/Met), dont l'efficacité suit une courbe développementale équivalente à celles des participants Val/Val. Néanmoins, le rapport entre ces génotypes et les capacités cognitives fait débat. Par exemple, Haraldsson et al. (2010) ont reporté de meilleures performances chez les adultes portant l'allèle Val à une tâche d'anti-saccade, qui sollicite les capacités d'inhibition afin d'effectuer une saccade dans la direction opposée à la cible périphérique. En effet, des preuves suggèrent que les individus avec l'allèle Met sont plus efficaces cognitivement (Egan et al., 2001), mais leur proximité du sommet de la courbe de réponse dopaminergique (Goldman-Rakic et al., 2000) permet que le seuil critique de signalisation de la dopamine soit dépassé avec la charge de traitement d'information, détériorant ainsi la réponse cognitive subséquente (Mattay et al., 2003; Meyer-Lindenberg et al., 2005). Il est donc possible que les différences interindividuelles dépendent à la fois de la charge mentale et du taux de dopamine au cours du développement selon le génotype ; ainsi, l'allèle Val serait plus avantageux dans les étapes précoces du développement, lorsque les niveaux de dopamine sont plus élevés qu'à l'âge adulte (Padmanabhan & Luna, 2014).

D'autres polymorphismes fonctionnels de COMT ont été listés pour leur rapport avec la cognition (Tunbridge et al., 2019), tels que rs165599, impliqué dans la schizophrénie (Gozukara Bag, 2018) ; rs4633 et rs4818, associés à la symptomatologie de certaines pathologies, comme la réponse à la douleur dans la maladie de Parkinson (Lin et al., 2017), par exemple.



#### 1.6.3.1.2. DAT

Le gène DAT1 est situé dans le chromosome 5p15.33. Il code pour le transporteur sélectif DAT (*dopamine active transporter*), qui constitue le principal régulateur de la signalisation de dopamine dans le cerveau (Volkow et al., 2017). Il est responsable pour l'élimination de ce neurotransmetteur dans la fente synaptique des structures sous-corticales, principalement, comme le striatum où il est surreprésenté (Padmanabhan & Luna, 2014). Ainsi, les SNP du gène DAT sont associés à des différences individuelles dans les tâches cognitives qui sont notamment sous-tendues par les circuits frontostriataux (Lewis et al., 2019). Par exemple, son activité est la cible de la molécule méthylphénidate, qui désigne le traitement médicamenteux classique contre le TDAH (Storebø et al., 2015). En effet, le méthylphénidate fait augmenter le taux de dopamine disponible dans le striatum et les ganglions de la base, où DAT1 est abondant. Cela a pour but de faciliter ou supprimer l'action via l'équilibre de la dopamine qui y est disponible, pouvant moduler l'inhibition comportementale assurée par ces structures (Cummins et al., 2012).

Des associations entre les SNP de la DAT1 et des troubles psychiatriques sont communes (Bamne et al., 2010). Par exemple, Kelada et al. (2005) ont rapporté que l'allèle C du SNP rs3756450 présente une action promotrice plus faible que l'allèle T sur les mêmes haplotypes, cet allèle étant fortement associé à la schizophrénie. En effet, plusieurs SNP de DAT1 sont associés à ce trouble psychiatrique, comme rs2975226, rs2652510, rs28362317, rs2550956, rs2617596, rs2652511 et rs3756450, classés en ordre croissant d'effet sur l'activité promotrice (Huang et al., 2010; Kelada et al., 2005; Talkowski et al., 2008). De plus, le polymorphisme rs28363170 est impliqué dans l'expression réduite de DAT, ce qui engendre des niveaux de dopamine striatale extrasynaptique relativement plus élevés chez les porteurs (Frydecka et al., 2021). Cela peut affecter les réponses cérébrales et comportementales sollicitant la flexibilité cognitive (Garcia-Garcia et al., 2010) et la gestion de la charge mentale en mémoire de travail, dont la précision des performances dépend à la fois de la mise à jour des informations pertinentes ainsi que l'inhibition de l'interférence des informations non pertinentes (Stollstorff et al., 2010) et l'apprentissage (Baetu et al., 2015). En outre, l'aide de l'IRMf, Cummins et al. (2012) ont démontré que l'efficacité de l'activation des circuits frontostriataux d'inhibition de la réponse varie en fonction de la variation allélique du SNP rs37020.

Il est également important de noter qu'il existe plusieurs types de polymorphismes génétiques. Pour le gène DAT1, les polymorphismes de type VNTR (répétitions en tandem à nombre variable) sont majoritairement étudiés dans la littérature vis-à-vis des performances cognitives, comme le CI (Congdon et al., 2008), notamment dans le cadre des pathologies – pour une revue, voir Fuke et al.(2001). Dans cette thèse, nous porterons notre regard uniquement sur les polymorphismes de type SNP.

#### 1.6.3.1.3. *DRD1, DRD2*

La dopamine peut se lier à cinq récepteurs dopaminergiques différents, D1-D5, qui constituent des récepteurs couplés aux protéines G afin de moduler les cascades de signalisation intracellulaire (Ott & Nieder, 2019). Ces récepteurs se divisent en deux familles, celle des récepteurs D1 de la dopamine (D1R) avec les sous-types D1 et D5, et celle des récepteurs D2 de la dopamine (D2R) avec les sous-types D2, D3 et D4. Les récepteurs D1 s'expriment dans toutes les couches corticales du CPF des primates et sont plus présents que les récepteurs D2 (Jackson & Westlind-Danielsson, 1994). Ces deux familles assument des rôles complémentaires dans le contrôle cognitif.

Le gène DRD1 code pour le récepteur D1 de la dopamine (Ott & Nieder, 2019). L'allèle G du SNP rs686, localisé sur le gène DRD1, a été associé à une densité réduite des récepteurs D1 par rapport à l'allèle A (Huang & Li, 2009). Partant du postulat selon lequel le SNP rs686 influence la capacité d'apprendre la bonne réponse par essai et erreur, Baetu et al. (2015) ont observé que les porteurs de l'allèle A ont appris les séquences d'action plus rapidement que les autres participants. Cela rejoint les arguments indiquant que l'apprentissage par récompense est associé à la densité des récepteurs D1 dans le striatum (Frank & Hutchison, 2009; Meyer-Lindenberg et al., 2005). Ainsi les individus présentant le génotype associé à une densité plus importante de D1 seraient plus susceptibles de sélectionner les bonnes réponses.

Parallèlement, l'allèle G du SNP rs4532, localisé dans la région 5' non traduite de DRD1, implique une plus grande efficacité des récepteurs D1 et est associé à un contrôle cognitif accru (Beste et al., 2016). Zink et al. (2019) ont constaté que les porteurs de l'allèle G de ce SNP sont plus à même que les non-porteurs d'exercer un contrôle cognitif efficace dans des

situations de forte demande cognitive, i.e. des tâches complexes qui recrutent l'attention soutenue, le CI et la flexibilité mentale (Bocanegra & Hommel, 2014).

Le récepteur D2 de la dopamine, localisé sur le chromosome 11q22-2, constitue l'un des marqueurs de susceptibilité à la schizophrénie les plus étudiés dans la littérature. En effet, la schizophrénie est associée à différents SNPs dans le locus DRD2/ANKK1, tels que rs6277 dans le gène DRD2 (Dubertret et al., 2010; Kukreti et al., 2006). Nkam et al. (2017) ont constaté une détérioration marquée des scores d'interférence au Stroop classique chez les porteurs du génotype TT du rs6275, ce résultat étant plus marqué chez les individus schizophrènes en comparaison au groupe contrôle. De plus, les patients ayant le génotype TT du rs6275 étaient moins performants que les témoins sur le taux de bonnes réponses et le temps de réaction à l'ANT, ce qui suggère également des déficits d'attention exécutive. Par ailleurs, Kollins et al. (2008) ont identifié une association significative entre les polymorphismes rs2075654 et rs1079596 du gène DRD2 chez les patients TDAH et les erreurs de commission à une tâche mesurant l'attention exécutive et les capacités inhibitrices (Conners' Continuous Performance Test, Conners & Sitarenios, 2011).

Stock et al. (2014) ont étudié les effets potentiels des SNP des récepteurs DRD1 (rs4531) et DRD2 (rs6277) sur le processus de sélection de la réponse. Ces processus impliquent l'évaluation des différents objectifs afin d'organiser l'action soit de manière sérielle, i.e. étape par étape, soit en parallèle, lorsque l'objectif d'une action se chevauche sur l'exécution d'une autre (Verbruggen et al., 2008). Partant du postulat selon lequel les récepteurs D1 et D2 entraînent des différences dans la chaîne de processus de sélection des actions (Maia & Frank, 2011), les auteurs observent une stratégie plus sérielle et plus efficace chez les porteurs homozygotes de l'allèle G de DRD1 à la tâche Stop-Change, en comparaison aux porteurs de l'allèle A. Pour les porteurs homozygotes de l'allèle T de DRD2, dont la densité de récepteurs D2 dans le striatum s'avère plus importante que chez les porteurs de l'allèle C, une stratégie parallèle et moins efficace a été mise en place. Cette distinction entre un mode de traitement plus sériel pour D1 et plus parallèle pour D2 évoque les bases neurobiologiques d'inhibition de la réponse et de flexibilité cognitive (Stock et al., 2014).

#### 1.6.3.1.4. BDNF

Abrégé de « *Brain-derived neurotrophic factor* » pour « facteur neurotrophique issu du cerveau », la protéine BDNF est située sur le chromosome 11p13 et joue un rôle essentiel dans le développement neuronal, la maturation cérébrale et la neuroplasticité (Notaras et al., 2015). Cette protéine se concentrant particulièrement dans le CPF et l'hippocampe, elle est associée à l'étiologie des troubles psychiatriques ainsi qu'à la cognition en général (Notaras et al., 2015; Tsai, 2018).

Il est bien établi que le BDNF intervient dans la survie et la différenciation des neurones périphériques au cours du développement (Thoenen, 1995). Des études chez l'animal indiquent que la libération de dopamine est influencée par le BDNF (Blöchl & Sirrenberg, 1996; Neal et al., 2003), ainsi que l'expression du récepteur D3 (Guillin et al., 2001). En effet, chez des souris dont le gène du BDNF est invalidé, la synthèse de la protéine et de l'ARNm du récepteur D3 est manquante durant le développement. Chez l'humain, BDNF est souvent étudié dans le contexte de la maladie de Parkinson, précisément en tant que facteur trophique pour les neurones dopaminergiques mésencéphaliques, rallongeant leur survie (Guillin et al., 2001; Hyman et al., 1991). Nous nous intéressons au BDNF par ses implications dans la cognition, notamment le CI, comme nous le détaillons par la suite.

Malgré le grand nombre de polymorphismes identifiés pour BDNF, c'est le SNP rs6265, aussi appelé Val66Met, qui fait l'objet de nombreuses études génétiques sur le comportement et la cognition (Mascheretti et al., 2021). Ce polymorphisme produit une substitution de la valine (Val) par la méthionine (Met) au codon 66, ce qui peut affecter le traitement intracellulaire et la sécrétion du BDNF (Egan et al., 2003). Cela peut représenter un facteur de risque pour le développement de pathologies, étant donné que l'allèle Met est associé à des réductions volumétriques dans la matière grise corticale, à savoir les zones frontales et temporales, ainsi que sous-corticale, comme l'hippocampe et l'amygdale (Mascheretti et al., 2021; Montag et al., 2009; Park et al., 2017). De plus, des vulnérabilités dans les circuits de fibres de matière blanche ont été également repérées chez les individus ayant l'allèle Met (Park et al., 2017). Par conséquent, l'allèle Met est associé à des troubles de mémoire et de l'apprentissage (Egan et al., 2003; Tsai, 2018), ainsi qu'à des conditions neuropsychiatriques, comme la dépression (Choi et al., 2015). En effet, le lien entre ce SNP et la détérioration des fonctions cognitives est souvent évoqué par la littérature (Dincheva et al., 2012; Tsai, 2018).

Précisément, de meilleures performances d'inhibition ont été relevées chez les porteurs du génotype Val/Val en comparaison aux porteurs de l'allèle Met dans la tâche Go/NoGo, et ce indépendamment d'un entraînement préalable aux capacités de CI pour tous les individus (Enge et al., 2016). Par ailleurs, le SNP Val66Met semble être également impliqué dans les effets délétères du vieillissement, notamment sur des fonctions cognitives particulièrement compromises par l'âge, comme le CI l'inhibition (Gajewski & Falkenstein, 2016).

Néanmoins, ce polymorphisme peut affecter différemment chaque FE. Par exemple, Alfimova et al. (2012) ont évalué le lien entre Val66Met et la fluence verbale sémantique, la MdT, la flexibilité mentale et l'inhibition de l'interférence chez les adultes typiques. Les résultats sont retenus pour la MdT uniquement, les porteurs hétérozygotes de l'allèle Met présentant de performances inférieures en comparaison aux homozygotes Val/Val et Met/Met. Par ailleurs, il n'y a pas consensus sur le lien entre le génotype Val66Met et les capacités de lecture. Bien que l'allèle Met soit associé à une performance affaiblie dans les tâches impliquant la lecture chez les enfants (Jasińska et al., 2016), cette corrélation n'est pas systématiquement retrouvée (Mascheretti et al., 2021).

#### **1.6.4. Aspects physiologiques**

Outre les éléments neurodéveloppementaux et génétiques, les aspects physiologiques sont impliqués dans l'efficacité du CI, comme le taux de glycémie sanguine (Bischoff, 2007; Feldman & Barshi, 2007; Kelly et al., 2015; Nabb & Benton, 2006; Scholey et al., 2001) et les facteurs chronobiologiques (Adan et al., 2010; Arendt, 1998; Schmidt et al., 2007; Schmidt & Bao, 2017).

#### 1.6.4.1. Glucose

Le glucose représente le principal apport énergétique au fonctionnement cérébral, fournissant l'adénosine triphosphate, ou l'ATP, nécessaire pour la maintenance cellulaire (Mergenthaler et al., 2013). Ainsi, les zones cérébrales activées par une activité donnée reçoivent un taux important de glucose afin de satisfaire leurs besoins métaboliques et mener l'action à bien (Buxton & Frank, 1997; Kelly et al., 2015). Cette corrélation a été démontrée par des études en tomographie à émission de positons (TEP) à l'aide des molécules telles que le 2-deoxyglucose et le 18-fluorodeoxyglucose (Adams et al., 1993; Johnson-greene et al., 1997; Sokoloff et al., 1977).

Il a été suggéré que l'effort cognitif nécessaire pour accomplir une tâche sollicite un apport glycémique correspondant (Scholey et al., 2001), la consommation de glucose dépendant donc de la charge cognitive exigée. Dans ce sens, en tant que fonction d'arbitrage et de blocage impliquant un coût cognitif (e.g. Aïte et al., 2018; Borst et al., 2015; Viarouge et al., 2019), le CI est précisément influencé par le taux glycémique. Par exemple, Fairclough & Houston (2004) ont observé que la glycémie sanguine varie selon l'engagement du CI lors du Stroop, étant d'autant plus conséquente pour les items incongruents car leur charge cognitive est supérieure à celle des items congruents.

Les régions cérébrales les plus actives ayant des besoins plus conséquents en glucose au détriment des zones moins actives (McNay et al., 2001), cela suggère que la quantité de glucose disponible est limitée. Gailliot et al. (2007) affirment que les activités impliquant le contrôle exécutif, comme le Stroop et la régulation attentionnelle, réduisent les niveaux de glucose dans le sang après une étape initiale réussie, ce qui entraîne une baisse des performances par la suite. Selon les auteurs, un seul acte de contrôle de soi ferait chuter la glycémie en dessous du seuil optimal, altérant ainsi les tentatives ultérieures de l'exercer.

Dans ce sens, l'hypoglycémie (<3.0 mmol/L ; 54 mg/dL) est fortement associée à une dégradation des performances cognitives (Graveling et al., 2013; Maran et al., 1995). En effet, l'ingestion de glucose dans le cadre expérimental permet d'élever la glycémie, ce qui produit des effets bénéfiques sur le temps de réaction en général (Owens & Benton, 1994) et sur la vitesse de performance au Stroop (Benton et al., 1994). En outre, une augmentation de

l'intensité du signal BOLD suit l'ingestion de glucose (Purnell et al., 2011), tandis qu'une réduction de son intensité a été relevée en hypoglycémie (Anderson et al., 2006).

De plus, Craft et al. (1994) ont mis en exergue que les niveaux élevés de glycémie après l'ingestion des boissons glucosées améliorent les temps de réponse, mais augmentent le nombre d'erreurs aux items incongruents du Stroop. L'effet néfaste du glucose est également observé chez les patients diabétiques, pour qui l'hyperglycémie sanguine entraîne une détérioration globale des performances cognitives (pour une revue sur le diabète de type 2, voir Palta et al. (2014)). Toutefois, il est essentiel de souligner que certaines capacités semblent être particulièrement sensibles à la condition diabétique. Ceci est le cas de l'inhibition de la réponse lors d'une tâche Go/noGo, dont les scores ont subi une dégradation plus importante chez les individus diabétiques en comparaison à flexibilité mentale, celle-ci demeurant intacte (Ishizawa et al., 2010).

Bien qu'il ait été démontré que le glucose affecte les performances cognitives, des résultats contradictoires sont présents dans la littérature (Feldman & Barshi, 2007). Cela peut évoquer à la fois la part jouée par les demandes cognitives hétérogènes et les différences interindividuelles au sein de la population, chaque sous-groupe présentant des particularités de régulation glycémique en fonction de l'âge et du sexe, par exemple. Pour l'illustrer, Craft et al. (1994) indiquent que les hommes âgés (entre 58 et 77 ans) sont plus sensibles aux effets du glucose sur la performance cognitive, spécifiquement la mémoire, que les hommes plus jeunes et les femmes plus jeunes ou plus âgées. En outre, l'hypoglycémie entraîne une détérioration plus importante des scores exécutifs, mesurés par le Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT), chez les personnes ayant un QI élevé que celles ayant un QI moyen (Gold et al., 1995).

Des résultats intéressants émergent de l'étude de Flint & Turek (2003), qui ont exploré l'effet de différentes doses de glucose (10, 100 et 500 mg/kg, ou 50 g) sur les scores d'attention chez les jeunes adultes typiques en comparaison à un groupe placebo. Seuls les individus ayant reçu des doses intermédiaires de glucose (100mg/kg) ont commis un nombre significativement élevé d'erreurs de commission, i.e. des déficits d'inhibition. Pour expliquer ces résultats, les auteurs avancent l'hypothèse d'une possible surstimulation des mécanismes de régulation glycémique, causant une absorption initiale accélérée du glucose et le défaut de disponibilité par la suite. Le dérèglement provoqué par l'ajout d'une dose modérée de glucose

(100 mg/kg) et une charge cognitive accrue altèrent la performance, tandis que des doses plus extrêmes ne produisent pas d'effet significatif.

Par ailleurs, cette idée de la régulation glycémique avancée par Flint & Turek (2003), renvoie au rôle de l'indice glycémique (IG). En effet, le glucose sanguin est notamment obtenu par la consommation d'aliments contenant des glucides. L'IG nous renseigne alors sur la vitesse de libération dans le sang de ce glucose issu des glucides. Plus précisément, cet indice est calculé en mesurant la glycémie sanguine deux heures après l'ingestion d'aliments contenant 50g de glucides par rapport au taux glycémique deux heures après la consommation de 50g de glucose. Ainsi, un aliment contenant des glucides à absorption lente possède un IG faible, e.g. l'avoine ; inversement, un aliment entraînant une absorption rapide du glucose présente un IG élevé, e.g. le pain blanc. L'IG constitue donc une information sur la qualité des glucides, la quantité n'y étant pas prise en compte (Jenkins et al., 1981).

Dans une revue systématique, Philippou & Constantinou (2014) ont exploré l'effet de l'IG sur la cognition à différents âges de la vie, i.e. des participants ayant entre 6 et 82 ans. Selon les auteurs, la littérature sur ce thème présente des résultats contradictoires, soit en faveur de bénéfices cognitifs apportés par un IG élevé, soit des avantages pour un IG faible, et encore aucune différence d'impact entre les deux taux. Ces incohérences peuvent s'expliquer par diverses sources de biais lorsque les résultats sont comparés, telles que l'échantillon sélectionné (la taille, l'âge, la régulation de la glycémie), l'heure d'acquisition des données cognitives, le domaine cognitif d'intérêt, le moment des prélèvements sanguins, entre autres.

Pour illustrer le lien entre l'IG et le CI, nous nous sommes focalisés sur les résultats obtenus aux tâches classiques d'inhibition, e.g. le Stroop, dans les expériences manipulant cet indice. Par exemple, Cooper et al. (2012) ont comparé les effets chez les adolescents de 12 à 14 ans de trois groupes expérimentaux, i.e. l'omission du petit-déjeuner, un petit-déjeuner de faible IG et un autre d'IG élevé. Les résultats indiquent que le faible IG a amélioré la performance des adolescents par rapport au petit-déjeuner d'IG élevé et à l'absence de ce repas. Cette amélioration sur le temps de réponse et la précision est plus marquée en fin de matinée, notamment pour les parties les plus coûteuses de la tâche, i.e. les items incongruents. En revanche, chez les enfants de 11 à 14 ans, Micha et al. (2011) ont observé un progrès des performances au Stroop après un petit déjeuner à IG élevé en comparaison à un repas ayant un IG faible.



#### 1.6.4.2. Chronobiologie

En lien indirect avec la consommation et la régulation de glucose, la chronobiologie constitue un facteur pouvant influencer l'efficacité cognitive et en particulier du CI.

La chronobiologie représente l'étude des rythmes biologiques dans l'organisme, ceux-ci étant à la base de la régulation de nombreux processus vitaux (Schmidt & Bao, 2017). En effet, les fonctions organiques sont organisées selon un rythme circadien chez l'humain, qui régule les oscillations endogènes sur un cycle de 24 heures (Rogers et al., 2003). Il est avéré que les perturbations des rythmes circadiens affectent la santé physique, le bien-être et la cognition (Hansen, 2014; Schmidt & Bao, 2017). Pour mieux comprendre leur lien avec le CI, il est nécessaire de considérer les principaux marqueurs de ces rythmes, tels que le sommeil, les heures de prise des repas et les différences interindividuelles des chronotypes, qui reflètent les préférences et les pics d'éveil dans la journée (Schmidt et al., 2007).

Au niveau physiologique, les noyaux hypothalamiques suprachiasmatiques détiennent le rôle des régulateurs circadiens, contrôlant les oscillations quotidiennes de sécrétion hormonale, de la fréquence cardiaque, de température corporelle, ainsi que le cycle sommeil-éveil et les propriétés cognitives qui y sont associées (Schmidt & Bao, 2017). Ils contiennent des gènes nommés « gènes horloge » en raison de leur synchronisation sur une période cyclique de 24 heures pour toutes ces fonctions (Arendt, 1998). Dans des conditions expérimentales rigoureusement contrôlées, il a été possible de constater que les capacités cognitives présentent également une amplitude circadienne, les pics d'activation variant selon la zone cérébrale recrutée par l'activité (Muto et al., 2016; Schmidt & Bao, 2017). Par exemple, dans un suivi micro-longitudinal, Muto et al. (2016) ont observé que les réponses neurofonctionnelles dans l'insula antérieure bilatérale lors de tâche N-back ont été significativement modulées par une oscillation circadienne, ce qui corrobore la rythmicité locale des signaux cérébraux dépendants de la nature de la tâche. De surcroît, Dijk et al., (1992) ont révélé que l'éveil prolongé est susceptible de détériorer significativement les performances cognitives à une tâche de calcul.

Il est actuellement connu que l'association entre les rythmes circadiens et l'équilibre homéostatique du sommeil n'est pas toujours linéaire, ce qui suggère des variations au cours de la vie (Hofman & Swaab, 2006; Münch et al., 2005). Effectivement, les fluctuations

neurocomportementales ne reflètent pas seulement les rythmes circadiens, mais rendent compte des changements endogènes provoqués par les échelons du développement, tels que la puberté. Précisément, les enfants présentent généralement un cycle orienté vers le matin, tandis que les adolescents sont davantage orientés vers le soir (Challamel & Franco, 2018; Roeser et al., 2012). Ce changement durant l'adolescence est la conséquence de divers facteurs, comme le prolongement transitoire du rythme circadien, l'allègement du sommeil lent profond, la baisse de sécrétion de la mélatonine, ainsi que le décalage du début de sa sécrétion nocturne (Challamel & Franco, 2018). Par conséquent, l'aspect développemental peut interagir avec les rythmes circadiens sur un large éventail de performances cognitives, en particulier dans les activités nécessitant des compétences de haut niveau, telles que les FE, dont le CI (Kelley et al., 2015; Schmidt et al., 2007). Dans ce sens, certaines études proposent des heures plus tardives pour le début des cours au lycée afin de mieux étayer la réussite académique (Giedd, 2009; Hagenauer et al., 2009; Kelley et al., 2015).

En outre, la chronobiologie fait aussi référence aux chronotypes. Un chronotype correspond aux préférences circadiennes sur le moment de sommeil, les heures d'éveil et d'efficacité cognitive (Kang et al., 2015). Selon Adan et al. (2012), l'expression des préférences circadiennes diffère entre individus et peut être classée en trois chronotypes, celui du matin, celui du soir, et un type intermédiaire, ce dernier représentant environ 60% de la population (Kang et al., 2015; Lipnevich et al., 2017). Cette classification se fait sur la base de questionnaires validés d'auto-évaluation, comme le Morningness–Eveningness Questionnaire (MEQ) par Horne & Ostberg, (1976). Les personnes ayant le chronotype du matin se couchent et se lèvent tôt, leurs performances cognitives étant optimales en début de journée ; les personnes du soir se couchent et se réveillent tard, étant plus efficaces cognitivement en fin de journée et en soirée. Une méta-analyse par Randler (2007) suggère également un effet significatif, bien que faible, du genre sur la préférence circadienne, les femmes étant plus orientées vers le matin que les hommes. Les décalages entre les deux groupes sont visibles sur des paramètres biologiques et comportementaux (Venkat et al., 2020), ainsi que génétiques (Archer et al., 2003).

De nombreuses études adressent la question sur l'impact des chronotypes sur la cognition, notamment les performances exécutives. Roberts & Kyllonen (1999) ont rapporté que le chronotype du soir est associé à des meilleurs résultats en mémoire de travail et en

vitesse de traitement, même lorsque les tâches sont réalisées tôt le matin. Lara et al. (2014) ont rapporté une diminution linéaire des capacités d'inhibition pour le chronotype matinal au cours de la journée ; en contrepartie, la diminution des performances a été linéaire lors de la session du matin pour les individus ayant un chronotype plus tardif, mais ce déclin a été atténué lors des tâches effectuées le soir. Par ailleurs, Adan et al. (2010) ont signalé une interaction entre la typologie circadienne et le genre sur les scores d'impulsivité au Dickman's Impulsivity Inventory (DII), les hommes du chronotype intermédiaire et de celui du soir exhibant une impulsivité significativement plus importante que les autres groupes. Pour les auteurs, les préférences matinales peuvent être un facteur de protection chez les hommes face à un dysfonctionnement d'inhibition comportementale. Dans une étude récente, Farahani et al.(2022) ont rapporté une influence du moment de la journée et des chronotypes sur les changements locaux/régionaux de la connectivité fonctionnelle au repos, principalement dans les zones associées aux réseaux frontopariétaux, moteur et attentionnel.

Parallèlement, des études mettent en exergue le lien entre la préférence pour le soir et les déficits d'inhibition associées à l'impulsivité (Adan et al., 2010; Kang et al., 2015). En effet, Kang et al. (2015) ont constaté une association entre le chronotype du soir et l'impulsivité mesurée par l'échelle d'impulsivité de Barratt (BIS), ainsi qu'un taux plus faible d'inhibition des réponses au Go/noGo pour ces sujets en comparaison au chronotype du matin. Il est important de souligner que la littérature avance des corrélations significatives entre les mesures d'impulsivité obtenues au BII et les erreurs de commission du Go/NoGo, ainsi que les défauts d'inhibition dans la tâche d'anti-saccade, au-delà des effets de l'âge, du sexe et de l'intelligence (Aichert et al., 2012). En outre, dans l'étude de Song et al. (2017), individus ayant un chronotype matinal présentent une diminution progressive des réponses neurofonctionnelles à la tâche Stop Signal du matin au soir, alors que ce pattern est inversé pour le chronotype du soir.

Pour conclure, les rythmes circadiens sont également organisés selon les cycles d'activité endocrinienne, qui incluent la prise alimentaire, l'appétit, la digestion et le métabolisme (Waterhouse et al., 1997; Wehrens et al., 2017). Dans ce sens, l'heure des repas influence les rythmes physiologiques, notamment vis-à-vis de l'homéostasie du glucose, dont l'importance sur les capacités cognitives a été traitée précédemment. Par exemple, une réduction de la concentration de glucose plasmatique est relevée après les repas tardifs.

(Wehrens et al., 2017). En détail, le moment du repas exerce une influence importante sur l'homéostasie glycémique, provoquant une dissociation temporelle entre ces deux processus qui participent à la maintenance des ressources cognitives (Stranahan & Mattson, 2012). Diverses études mettent donc en avant l'impact des habitudes alimentaires sur la cognition, comme l'heure des repas et la distance entre les collations et les tests effectués (Benau et al., 2014; Benton & Parker, 1998; Bischoff, 2007; Galioto & Spitznagel, 2016). Ainsi, des adultes typiques bénéficient d'un avantage sur la restitution en mémoire lorsqu'ils prennent un petit-déjeuner par rapport à ceux qui jeûnent le matin (Benton & Parker, 1998; Galioto & Spitznagel, 2016). Adolphus et al. (2016) ajoutent que les tâches exécutives ont été facilitées par la consommation d'un petit-déjeuner avant le test en comparaison au jeûne matinal. Chez les diabétiques, Hawkins et al. (2016) précisent une baisse des performances au Go/noGo lorsque le jeûne est long, ce qui élève le niveau glycémique à jeun.

## **1.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé le CI sous plusieurs facettes, passant en revue la multidimensionnalité de cette FE, ainsi que les facteurs à même d'influencer les compétences d'inhibition, aux niveaux génétiques, cérébraux et biologiques. L'entraînement du CI durant des fenêtres développementales plastiques, durant lesquelles le cerveau est particulièrement adaptable et malléable, constitue une occasion opportune pour l'apprentissage et le transfert des compétences, d'autant plus lorsque l'intervention est écologique et intégrée aux activités quotidiennes. Ainsi, il nous semble avantageux d'entraîner le CI, à la fois chez les enfants et les adolescents, par le biais d'une approche écologique qui puisse répondre aux besoins spécifiques de l'échantillon. Les expériences environnementales pouvant être particulièrement critiques, c'est dans ce contexte que nous évoquons le rôle de la méditation de pleine conscience en tant que pratique sous-tendue par le CI, dont les effets bénéfiques touchent la régulation attentionnelle, la gestion émotionnelle, les comportements pro-sociaux et les compétences scolaires (e.g. Beauchemin et al., 2008; Burke, 2010; Creswell, 2017; Diamond & Lee, 2011; Georgiou et al., 2020; Tang et al., 2015). Le prochain chapitre vise donc à examiner la méditation de pleine conscience au niveau cognitif et cérébral dans une perspective développementale.

2

# CHAPITRE

La méditation de pleine conscience

## 2. La méditation de pleine conscience

### 2.1. La méditation

La méditation constitue une famille de pratiques d'autorégulation ayant pour but de maîtriser les processus mentaux à travers la conscience et l'attention focalisée Walsh & Shapiro (2006). Cardoso et al. (2004) ont formulé une définition à partir de cinq composantes, à savoir (1) l'emploi d'une technique spécifique, clairement déterminée ; (2) la relaxation musculaire ; (3) la relaxation dite logique, qui survient sans l'intention d'en analyser les résultats ; (4) un état modifié de conscience auto-induit, et (5) l'auto-focalisation, c'est-à-dire l'utilisation d'une « ancre » pour l'attention. A partir de cette idée d'ancrage, la méditation peut être également définie comme une forme d'entraînement mental dans laquelle l'attention est ancrée sur un objet extérieur (i.e. un son) ou intérieur (i.e. la respiration), ayant pour but d'améliorer les habiletés psychologiques basales, telles que la régulation attentionnelle et la gestion émotionnelle (Ospina et al., 2007; Tang et al., 2015).

Etymologiquement, méditation vient du Latin « meditari » qui signifie « s'engager dans la contemplation ou réflexion » (Ospina et al., 2007). Le terme « meditari » dérive de « mederi » qui renvoie à « prendre soin », comme pour le mot « médecin ». Midal (2021) argumente que « prendre soin » dans la méditation serait associé à « adresser son attention », dans le sens où il faut porter son attention sur quelque chose dont on veut prendre soin.

### 2.2. Contexte historique

Historiquement, la méditation est profondément liée aux pratiques religieuses anciennes de l'Orient. Bien que les plus anciennes traces écrites décrivant des pratiques méditatives datent de 1500 ans avant notre ère, provenant d'école philosophique du Védantisme, les origines précises de la méditation sont toujours fortement débattues, notamment en ce qui concerne la méditation bouddhiste (Wynne, 2007). En effet, la pratique méditative est centrale dans cette doctrine qui désigne « méditation » comme *bhāvanā*, i.e.

« développement mental » (Polak, 2011; Wynne, 2007). Le bouddhisme s'introduisant vers le IV<sup>e</sup>-V<sup>e</sup> siècle avant l'ère courante, sur une zone géographique étendue (Levenson, 2018), il existe diverses formes de bouddhisme qui rassemblent des pratiques méditatives plus ou moins proches. Actuellement, l'intérêt se pose sur la méditation issue de deux courants, en Inde et en Chine, principalement (Loizzo, 2014; McMahan & Braun, 2017; Norman & Pokorny, 2017; Ospina et al., 2007).

En Inde, les traditions bouddhistes soulignent la pratique de Dhyāna (en Sanskrit) ou Jhāna (en Pāṭi), traduites communément par « méditation », c'est-à-dire l'entraînement de l'esprit afin de prévenir des pensées automatiques (McMahan & Braun, 2017). Chaque Jhāna est caractérisée par un ensemble particulier de compétences, telle que l'attention soutenue et l'unicité corps-esprit, quatre Jhānas étant nécessaires pour un atteindre un stade méditatif libérateur profond. Ainsi, les pratiques encourageant l'absorption de l'esprit et la concentration calme (dite « Samatha ») sont des références anciennes à la méditation qui emploient des techniques d'attention focalisée dans le but de réduire l'errance mentale et de contempler des attitudes particulières, des jugements éthiques et des concepts philosophiques (Wynne, 2007).

En Chine, les premières formes de méditation apparaissent vers 300 ans avant notre ère, associées à la doctrine taoïste qui propose, dans ses bases, une voie de méditation pour atteindre la paix intérieure par des étapes telles que « conserver l'équilibre », « embrasser l'unicité », « cultiver le calme » et « garder la simplicité » (Arnold, 2019; Camus, 2001; Mathieu, 2019). En effet, le philosophe *Lǎo zi*, pilier taoïste, préconise que les pensées doivent être ôtées des concepts et des jugements afin que l'esprit appréhende le monde intérieur et le monde environnant (Camus, 2001). Lors de la période de consolidation de la doctrine taoïste au VII<sup>e</sup> siècle, la dynastie des Tang instaure une tendance générale à la méditation, à la contemplation intérieure nommée « neiguan », dont le concept emprunte des enseignements bouddhistes sur l'introspection, la concentration et la relation avec le corps à travers ladite alchimie interne (« nei dan ») (Mathieu, 2019). Celle-ci correspond à l'idée selon laquelle l'esprit peut maîtriser le corps en se retournant sur soi, notamment par des exercices de souffle (Mathieu, 2019).

Ces traditions méditatives ont croisé les siècles et ont atteint différentes cultures, principalement en Europe et dans les Amériques, donnant lieu à diverses pratiques qui ont été détaillées par les sciences dans le XXe siècle afin d'explorer leurs effets cérébraux, cognitifs, comportementaux et psychothérapeutiques (Cardoso et al., 2004). Certains chercheurs ont alors proposé des alternatives à l'appellation « méditation » dans le but d'atténuer l'ancrage religieux du terme, comme Wallace et al. (1971) qui ont suggéré la désignation « État physiologique hypométabolique éveillé » (Awakefull Hypometabolic Physiologic State). Néanmoins, la popularité du terme original a prévalu, couvrant actuellement un ensemble de pratiques diverses. Dans une revue systématique, Ospina et al. (2007) ont relevé cinq grandes catégories de pratiques sous l'appellation « méditation », i.e. la méditation de pleine conscience, la méditation mantra, le yoga, le tai-chi et le qi gong.

L'intérêt scientifique pour ces pratiques a évolué au fil du temps, allant de la méditation zen dans les années 1950, la méditation transcendantale dans les années 1960, jusqu'à la méditation de pleine conscience dès les années 1970, avec un regard plus focalisé ces dernières années (Burke et al., 2017). Bien que leur hétérogénéité théorique et terminologique rende difficile la comparaison des effets rapportés, les études ont mis en lumière l'impact des interventions méditatives dans diverses populations, comme les modifications cérébrales de la matière grise (e.g. Hölzel et al., 2011; Yuan et al., 2020) et de la matière blanche ( e.g. Tang et al., 2010, 2019), une amélioration de l'attention ( e.g. Åsli et al., 2021; Ben-Soussan et al., 2017; Jha et al., 2007), des fonctions exécutives (e.g. Bauer et al., 2019; Diamond, 2012; Mak et al., 2018; Zelazo et al., 2018), de la santé mentale (e.g. Solhaug et al., 2019; van de Weijer-Bergsma et al., 2014) et de la régulation émotionnelle (e.g. Basso et al., 2019; Farb et al., 2014; Menezes & Bizarro, 2015; Wadlinger & Isaacowitz, 2011). Dans cette thèse, nous allons nous focaliser sur la méditation de pleine conscience chez les sujets au développement typique.



### 2.3. La méditation de pleine conscience

Depuis environ trois décennies, la méditation de pleine conscience est devenue célèbre dans le milieu scientifique, indépendamment de ses racines religieuses (Fall, 2016). Malgré sa popularité, le concept de la pleine conscience, « mindfulness » en anglais, ne fait pas consensus (Bishop et al., 2004; Davidson & Kaszniak, 2015; Dreyfus, 2011). Comme nous l'avons évoqué précédemment, ce concept est originaire des doctrines spiritualistes qui le définissent, grosso modo, comme l'attention soutenue portée au moment présent (Csillik & Tafticht, 2012). En effet, le terme « mindfulness » est une traduction anglaise du mot pāli « sati », qui renvoie à l'attention, à la conscience, à la rétention et au discernement (Bodhi, 2011; Davidson & Kaszniak, 2015). Néanmoins, les définitions expriment certaines spécificités selon les auteurs, du point de vue théorique et d'opérationnalisation, mettant en avant certaines compétences telles que l'autorégulation (Brown & Ryan, 2003), la métacognition (Bishop et al., 2004), l'acceptation (Masselin-Dubois, 2016), la gestion émotionnelle (Farb et al., 2014), entre autres.

Nous nous baserons sur le concept établi par Kabat-Zinn (1994, p. 4), et repris par grand-nombre d'études : la méditation de pleine conscience est alors définie comme un exercice d'attention portée délibérément sur le moment présent, sans jugement associé, ainsi que l'état de conscience éveillé qui en découle. Kabat-Zinn (1994) ajoute que la pleine conscience invite à vivre consciemment le moment présent, tout en gardant l'esprit dépourvu de jugements et ouvert aux sensations provenant des cinq sens. Cela s'applique donc à tout ce qui peut être senti, vu et perçu (Kabat-Zinn, 2003). Il est important de souligner que cette définition n'est guère nouvelle, partageant des ressemblances conceptuelles avec le « vivre à propos » décrit par le célèbre philosophe Montaigne (Rigaud, 2005), par exemple. La pleine conscience permet ainsi de lutter contre l'errance de l'esprit (dit « mindwandering »), qui serait associée à des émotions négatives, voire à l'absence de bonheur (Killingsworth & Gilbert, 2010). Ce sujet sera abordé plus en détails dans les chapitres suivants.

### 2.3.1. La méditation de pleine conscience : caractérisation trait & état

Les individus ne présentent pas les mêmes capacités pour atteindre un état méditatif ou un niveau de changement similaire suite à un entraînement basé sur la pleine conscience (Tang & Posner, 2013). Ces différences interindividuelles ont préconisé la distinction entre la disposition à la pleine conscience, tel un trait de personnalité, nommée « pleine conscience trait », et un état méditatif mis en place délibérément, i.e. « la pleine conscience état » (Tang, 2017b; Wheeler et al., 2016). Ces deux compétences sont mesurables via des questionnaires qui permettent de rendre compte des propensions innées à la méditation de pleine conscience, ainsi que des habiletés pouvant être entraînées (Fall, 2016).

La pleine conscience « trait » évoque la tendance innée à accéder et à rester dans un état de pleine conscience au fil du temps (Carpenter et al., 2019; Tang, 2017b; Wheeler et al., 2016), qui peut s'exprimer chez chaque individu sur différents aspects, à différents degrés (Brown & Ryan, 2003). Bien que la pleine conscience trait soit généralement considérée comme étant stable, il est possible qu'elle soit modulée par les expériences de vie ou par la pratique méditative (Shapiro et al., 2011). Cela signifie que les personnes peuvent modifier par la pratique leur manière de sentir, de penser ou d'agir dans la vie courante, ce qui étaye l'importance d'évaluer la propension à la pleine conscience à différents moments afin d'avoir une mesure plus fiable (Tang, 2017b). Il existe actuellement plusieurs échelles et questionnaires pour analyser cette propension, bien que leurs structures conceptuelles reflètent l'absence de consensus sur la définition même de la pleine conscience (Fall, 2016). Par exemple, certains questionnaires considèrent la pleine conscience soit en tant qu'un construit unidimensionnel – Mindful Attention Awareness Scale (MAAS ; Brown & Ryan, 2003) ou Freiburg Mindfulness Inventory (FMI, Buchheld et al., 2001) – soit pluridimensionnel, comme le Toronto Mindfulness Scale (TMS version trait, Davis et al., 2009) et le Five Facets Mindfulness Questionnaire (FFMQ, Baer et al., 2006).

Plus précisément, la MAAS est une échelle de 15 items qui mesure la « présence ou l'absence d'attention et de conscience de ce qui se passe au moment présent » (Brown & Ryan, 2003, p. 824) et qui possède des caractéristiques psychométriques robustes sur une structure factorielle unidimensionnelle (Brown & Ryan, 2003; Jermann et al., 2009; MacKillop & Anderson, 2007). Cette échelle rend compte également des améliorations des scores à la

suite d'un programme d'entraînement de la pleine conscience sur huit semaines (Brown & Ryan, 2003). Comme dans sa version originale, l'adaptation française présente une forte structure à un facteur. De plus, la MAAS entretient une relation avec la sévérité des symptômes dépressifs (Jermann et al., 2009).

Le FMI est un questionnaire de 30 items, ou 14 items pour la version raccourcie, qui mesure la tendance à porter une attention sans jugement à l'expérience du moment présent, permettant de distinguer les individus expérimentés en méditation et les novices (Walach et al., 2006). Malgré une excellente cohérence interne ( $\alpha = 0.93$  ;  $\alpha = 0.86$  pour la version réduite, Walach et al., 2006), sa structure unidimensionnelle est mise en question (Kohls et al., 2009). En effet, une version bidimensionnelle du questionnaire exhibe de meilleurs indices d'ajustement, mais une cohérence interne amoindrie ( $\alpha_{F1} = 0.71$  ;  $\alpha_{F2} = 0.64$ ), ces facteurs étant (F1) présence et (F2) acceptation (Kohls et al., 2009). Pour Trousselard et al. (2010), qui ont proposé la validation française de cette échelle, les scores du FMI peuvent également varier selon les caractéristiques démographiques, les personnes typiques plus âgées ayant des scores plus élevés.

Le TMS est une échelle de 13 items qui examine deux facteurs : (F1) la curiosité, i.e. l'envie d'apprendre plus sur ses propres expériences, et (F2) la décentration, i.e. l'attitude de ne plus s'identifier personnellement à ses pensées et à ses émotions, ce qui implique une conscience plus élargie (Lau et al., 2006). Cette échelle initialement conçue pour mesurer la pleine conscience état, la version trait présente une cohérence interne comparable à son homologue. De plus, le facteur « décentration » semble augmenter avec l'expérience méditative, ce qui n'est pas le cas pour le facteur « curiosité » (Davis et al., 2009). Le TMS ne présente pas, à notre connaissance, une version validée en français.

Le FFMQ est un questionnaire de 39 items qui permet de déceler cinq facteurs à la base de la Pleine Conscience, à savoir : (F1) l'observation de l'expérience présente, (F2) la description de l'expérience présente, (F3) l'action en pleine conscience, (F4) le non-jugement et (F5) la non-réactivité aux phénomènes psychologiques (Baer et al., 2006). Il entretient des relations avec des nombreuses échelles de pleine conscience préexistantes (Siegling & Petrides, 2014). En effet, des analyses factorielles confirmatoires ont indiqué que quatre facteurs du FFMQ – au moins – constituent des composantes d'un construit global de la pleine conscience, pouvant varier en fonction l'expérience méditative (Baer et al., 2006; Siegling & Petrides, 2014). Il est donc possible de connaître la tendance générale du sujet à être

conscient de ses expériences, ainsi que le caractère multidimensionnel de la pleine conscience. En comparant le FFMQ au célèbre test de personnalité le Big Five (Costa & McCrae, 1992), Giluk (2009) a souligné des corrélations fortes entre la pleine conscience et le névrosisme, i.e. la tendance à éprouver des affects négatifs, et la conscience. Celle-ci, notamment, est associée à la compétence, au dévouement, à l'ordre, à la délibération et à l'autodiscipline, voire l'autorégulation (Costa & McCrae, 1992). Parmi ces atouts, la délibération s'aligne avec la dimension de non-jugement et non-réactivité de la pleine conscience ; l'autodiscipline évoque l'attention centrée sur le présent, qui s'approche également de l'ordre et de la compétence (Giluk, 2009). Pour ce qui relève des affects négatifs, Kohls et al. (2009) ont constaté une corrélation négative entre la pleine conscience, l'anxiété et la dépression, entièrement due au facteur « acceptation ». La version francophone validée du FFMQ conserve les propriétés psychométriques satisfaisantes de la version originale (Heeren et al., 2011).

La pleine conscience dite « état » désigne la capacité à être dans un état méditatif de manière ponctuelle et délibérée, ce qui rejoint l'idée selon laquelle la pleine conscience est aussi une compétence passagère (Bishop et al., 2004; Lau et al., 2006). Ainsi, la pleine conscience peut constituer une aptitude momentanée, intentionnelle et réfléchie d'introspection, dont la spécificité repose sur le développement d'une conscience élargie de l'expérience du moment présent, i.e. les pensées, les émotions et les sensations physiques à l'instant où cela se produit (Smith, 1975). Un nombre plus réduit d'échelles mesurent l'état de pleine conscience, comme la version à cinq items de la MAAS (Brown & Ryan, 2003), le FMI avec des items adaptés sur le temps verbal (Walach et al., 2006), la version originale de la TMS (Lau et al., 2006), le Mindfulness Process Questionnaire (MPQ ; (Erisman & Roemer, 2012) et, plus récemment, la Applied Mindfulness Process Scale (AMPS ; Li et al., 2016). En effet, la MAAS peut saisir la pleine conscience en tant que trait, mesurant les différences interindividuelles de disposition, ou en tant qu'état, i.e. un état qui varie au cours du temps chez un même individu (Fall, 2016). En outre, la TMS version état possède l'atout de pouvoir être employée immédiatement après une expérience de méditation. Dans ce sens, le MPQ et l'AMPS permettent de quantifier les effets individuels d'une expérience de pleine conscience. Précisément, le MPQ est un questionnaire de sept items qui mesure le passage d'un état de

moindre conscience - décrit comme "les incertitudes de la vie" - à un état de conscience éveillée, caractérisé notamment par l'acceptation du moment présent (Erisman & Roemer, 2012). Parallèlement, l'AMPS comprend la pleine conscience comme un moyen de faire face aux sources de stress quotidien et aux événements indésirables par le biais de la décentration et de la régulation émotionnelle (Li et al., 2016).

### **2.3.2. Les principales interventions basées sur la pleine conscience**

Également conçue comme une forme d'entraînement mental (Tang et al., 2015), la méditation permet d'entraîner la pleine conscience par le biais de nombreuses interventions intégrant des techniques plus ou moins communes, chez les populations typiques et atypiques (Fall, 2016). Dans la présente thèse, nous ne couvrirons pas les divers programmes méditatifs s'adressant à la psychopathologie en tant qu'outil thérapeutique. Bien que les approches détaillées ci-dessous relèvent des applications cliniques ou en soient issues, elles figurent fréquemment dans la littérature scientifique sur l'entraînement cognitif des individus tout-venants, d'où l'intérêt spécifique qu'elles suscitent pour cette thèse.

#### **2.3.2.1. MBSR (Mindfulness-Based Stress Reduction)**

Le programme MBSR, l'acronyme de « Mindfulness-Based Stress Reduction » (Kabat-Zinn, 1982), constitue la première tentative d'apport de la pleine conscience à la médecine et à la psychologie (Fall, 2016). Il remonte aux tentatives de soigner les douleurs chroniques et les troubles associés au stress chez les patients du Centre Médical de l'Université du Massachusetts, pour qui le traitement habituel n'était pas efficace ou satisfaisant (Kabat-Zinn, 1982). Le but du programme était de développer chez ces individus le sentiment de responsabilité sur leur bien-être et leur santé via des techniques de pleine conscience, telles que la balayage des sensations corporelles et la régulation des émotions par le biais de la réappréciation cognitive (Kabat-Zinn, 1982, 1994, 2003). Dans un suivi longitudinal (Kabat-Zinn, 1982), les participants ont présenté des réductions importantes des douleurs rapportées et des troubles de l'humeur après 10 semaines d'intervention, ces améliorations étant indépendantes de la catégorie de la douleur signalée.

Il y a deux décennies, le protocole MBSR comptait déjà 240 programmes en Amérique du Nord et en Europe (Bishop, 2002). Compte tenu de sa célébrité, il constitue l'un des protocoles les plus fréquemment employés dans la recherche expérimentale (Baer, 2003; Khoury et al., 2015).

Le programme MBSR est dispensé pour des effectifs d'environ 30 participants selon une durée préétablie de 8 à 10 semaines, en sessions hebdomadaires d'approximativement deux heures et demie (Bondolfi et al., 2011; Chiesa & Serretti, 2009; Fall, 2016). Il comprend également un jour de retraite et des exercices à faire en autonomie à domicile, à raison de minimum 45 minutes par jour, six jours par semaine (Baer, 2003). La pratique méditative est associée à des groupes de discussion sur le stress et les stratégies de coping pour y faire face (Baer, 2003; Fall, 2016). Les exercices de méditation permettent de focaliser la conscience sur le moment présent, en accord avec le concept même de pleine conscience issue des traditions bouddhistes, mais sans y attacher un ancrage spirituel (Kabat-Zinn, 2003). Dans la pratique formelle, les techniques employées pour entretenir la pleine conscience couvrent le balayage corporel, qui implique centrer l'attention sur les sensations physiques ; la méditation assise, focalisée sur la respiration, les pensées ou encore l'intéroception ; les mouvements en pleine conscience, tels que la marche en pleine conscience et les étirements corporels inspirés notamment du yoga (Bondolfi et al., 2011; Fall, 2016).

La pratique informelle prône la pleine conscience dans les activités quotidiennes sans changer leur déroulement. Il faut ainsi porter son attention sur la tâche en cours, tout en redirigeant paisiblement les pensées déviantes vers la cible attentionnelle, sans y associer des jugements et en tenant compte du caractère transitoire de chaque expérience (Baer, 2003; Bishop, 2002; Bondolfi et al., 2011; Fall, 2016). Le programme inclut « l'exercice du raisin sec » qui consiste à explorer un raisin sec à travers la vue, l'odorat, l'ouïe, le toucher et le goût, telle la découverte d'un aliment jamais essayé. La dégustation clôture l'exercice, en mettant l'accent sur l'importance de se saisir des expériences dans leur totalité pour éviter les pensées automatiques (Histel-Barontini, 2021) qui peuvent constituer une source d'émotions négatives (Killingsworth & Gilbert, 2010). Hong et al. (2014) ont rapporté des niveaux plus élevés d'appréciation de la nourriture chez les individus ayant participé à l'exercice du raisin sec en comparaison à aux témoins et au groupe de contrôle actif, i.e. dégustation sans

appliquer la pleine conscience. Le MBSR est donc à même d'aider les pratiquants à reconsidérer leur détresse physique et psychologique avec acceptation (Fall, 2016).

De nombreuses études ont opérationnalisé le MBSR dans des essais contrôlés et randomisés, chez les populations typiques et non typiques, évaluées par des revues et méta-analyses (Anderson et al., 2007; Baer, 2003; Carmody et al., 2009; Chiesa & Serretti, 2009; Grossman et al., 2004; Khoury et al., 2015; Querstret et al., 2020) qui mettent en avant les atouts du programme. Chez les sujets tout-venants, le MBSR réduit modérément le stress, la dépression et l'anxiété ; cependant, des recherches supplémentaires sont encore nécessaires pour approfondir ces résultats (Khoury et al., 2015). Parallèlement, les changements fonctionnels et structurels induits par le MBSR incluent le CPF, le cortex cingulaire, l'insula, l'hippocampe et l'amygdale, celles-ci compatibles avec une meilleure régulation émotionnelle (Gotink et al., 2016).

Récemment, le MBSR a attesté des effets bénéfiques dans la gestion du stress et d'émotions appariées chez des patients atteints de cancer (Cillessen et al., 2019; Lengacher et al., 2021), des étudiants et professionnels de santé (Green & Kinchen, 2021; Polle & Gair, 2021), des militaires (Chen et al., 2021), entre autres. La pandémie de Covid-19 a également suscité des considérations sur le rôle du MBSR pour le bien-être, i.e. l'acceptation de soi et la relation avec autrui (Accoto et al., 2021; Behan, 2020), particulièrement chez les enseignants (Liu, 2020; Matiz et al., 2020). Il convient de noter que bon nombre d'interventions se sont dématérialisées, ce qui élargit l'accessibilité des programmes. Dans une méta-analyse sur diverses interventions en ligne, les résultats indiquent globalement un effet faible – mais positif – sur la dépression, l'anxiété, le bien-être et la conscience ; le MBSR étant le programme le plus récurrent dans les études examinées, l'impact sur le stress est mis en exergue, principalement lors des séances guidées (Spijkerman et al., 2016).

Bien que la plupart des recherches s'accordent sur les gains apportés par le MBSR, des critiques ciblées ont été avancées (e.g. Baer, 2003; Bishop, 2002), signalant notamment des problèmes méthodologiques qui interrogent la robustesse des résultats obtenus. L'accent est mis sur l'absence des protocoles contrôlés randomisés et la sélection de groupes de contrôle inactif, ce qui peut occulter des variables potentiellement confondues dans les progrès rapportés, telles que l'attention des thérapeutes auprès des patients, le soutien social et la motivation (Bishop, 2002). De même, les échantillons réduits et parfois non appariés en genre,

âge et problématiques présentées font émerger des questions sur l'efficacité du programme (Sharma & Rush, 2014). Ces variables pouvant elles-mêmes améliorer les résultats, il est difficile d'attribuer les changements observés aux spécificités du protocole MBSR. Par ailleurs, certains auteurs argumentent que le MBSR peut être contre-indiqué pour certains échantillons, i.e. les personnes ayant subi un traumatisme ou présentant une psychose (Dobkin et al., 2012; Farias & Wikholm, 2016). Faire face à au flot de pensées, en rythme soutenu, lorsque celles-ci rappellent des traumatismes ou lorsqu'il y a dissociation, pourrait potentiellement renforcer des affects négatifs, voire aggraver des troubles mentaux (Dobkin et al., 2012; Manocha, 2000). Malgré les résultats encourageants au niveau comportemental, une étude récente et rigoureusement contrôlée (Kral et al., 2022) n'a pas pu rapporter des changements structurels induits par ce programme dans les analyses sur cerveau entier ou dans les régions cérébrales d'intérêt, en comparaison à un groupe témoin et à un groupe de contrôle actif. Cependant, au-delà des limites évoquées, la pratique du MBSR semble être prometteuse pour la gestion du stress.

Le MBSR a également inspiré de programmes s'adressant à des problématiques variées. Par exemple, le programme de prévention de la rechute basée sur la pleine conscience (MBRP – Mindfulness-Based Relapse Prevention ; Bowen et al., 2011) pour les individus souffrant d'addictions ; le programme d'amélioration de la relation de couple (MBRE – Mindfulness-Based Relationship Enhancement ; Carson et al., 2004), ou encore la célèbre thérapie cognitive basée sur la pleine conscience (MBCT ; Teasdale et al., 1995) qui combine un entraînement à la pleine conscience avec des techniques de thérapie cognitive afin de prévenir la rechute dépressive (Williams et al., 2008).

#### **2.3.2.2. MAPs (Mindfulness Awareness Practices)**

Nous faisons ici un aparté sur les pratiques de pleine conscience (« Mindful Awareness Practices », MAPs), qui constituent des programmes éducatifs emblématiques du « Mindful Awareness Research Center » en Californie, aux Etats-Unis. Ces programmes s'inspirent des principes du MBSR, proposant une brève introduction suivie d'une pratique méditative essentiellement assise, où l'attention est focalisée sur les expériences internes et externes. L'ouverture, la curiosité et l'acceptation sont également exercées (Yamada & Victor, 2012).



Flook et al. (2010) ont évalué les effets des MAPs chez les enfants âgés de 7 à 9 ans dans le curriculum scolaire pendant huit semaines. Cette étude souligne les gains en régulation comportementale, métacognition et contrôle exécutif global, évalués par la « Behavior Rating Inventory of Executive Function » (BRIEF ; Gioia et al., 2000), chez les participants ayant suivi le protocole par rapport au groupe contrôle. Plus précisément, les enfants dont les FEs étaient moins performantes au départ ont le plus bénéficié de l'entraînement (Flook et al., 2010). En outre, Yamada & Victor (2012) ont introduit les MAPS dans le cadre académique de l'enseignement supérieur pendant le semestre, i.e. 15 semaines. Ces pratiques ont suscité une baisse de la rumination mentale et de l'anxiété, mais aucun impact n'a été repéré dans la performance scolaire.

D'autres interventions basées sur la pleine conscience ont prouvé leur efficacité auprès du public. Ceci est le cas de FOVEA (Flexibilité Ouverture, basé sur la méthode Vittoz pour favoriser l'Expérience Attentive). Conçu comme un programme standard de pleine conscience, il se déroule sur huit semaines et s'inspire des pratiques dont le but est de réduire les réponses automatiques inadaptées et améliorer l'autorégulation en maintenant l'attention sur le moment présent (Shankland et al., 2021). Les pratiques sont considérées comme brèves et informelles, ce qui peut renforcer leur aspect écologique. Dans un article récent, Shankland et al. (2021) ont testé auprès d'un public d'adultes cette intervention par rapport à un groupe témoin. Les auteurs ont rapporté une réduction du stress et des affects négatifs, comprenant des signes d'anxiété et de dépression, ainsi qu'une augmentation de la satisfaction dans le groupe FOVEA en comparaison aux témoins. Ces effets se sont maintenus deux mois et demi après la fin du programme. Des résultats similaires ont été observés dans le groupe témoin qui a suivi le programme FOVEA par la suite. Il est important de noter que ces effets ont été totalement médiatisés par l'augmentation des niveaux de pleine conscience autodéclarés. Cela suggère que l'inclusion de pratiques informelles dans la vie quotidienne peut augmenter la capacité d'atteindre un état de pleine conscience (Shankland et al., 2021).

### **2.3.2.3. IBMT (Integrative Body-Mind Training)**

IBMT est l'acronyme de « Integrative Body-Mind Training », l'entraînement intégratif corps-esprit est issu de combinaison entre la médecine traditionnelle chinoise et les postulats récents en neurosciences sur la pleine conscience (Tang, 2011). Développée dans les années 1990, ses effets font l'objet d'étude depuis 1995 lorsqu'il a été démontré auprès d'une large cohorte de sujets typiques ses bienfaits sur l'attention et l'autorégulation (Tang, 2011; Tang et al., 2007, 2010, 2017).

Selon Tang (2011), le programme IBMT implique la relaxation corporelle, la production d'images mentales et l'entraînement à la pleine conscience, associés une musique de fond. Cette musique a pour but d'induire préalablement un état d'esprit plus réceptif à l'entraînement, cognitivement et émotionnellement. Des instructions préenregistrées ou données par un entraîneur qualifié orientent un état de vigilance physique et mentale qui engendre la conscience intéroceptive et la conscience de soi, tout en combinant la relaxation avec l'éveil attentionnel. La maîtrise des pensées est obtenue progressivement sans effort, grâce à la posture et à la relaxation, à l'harmonie corps-esprit. Ce protocole s'adresse notamment aux échantillons non-cliniques, mais a déjà été appliqué dans la pathologie (e.g. l'addiction au tabac, Tang et al., 2013).

L'IBMT est souvent citée dans des protocoles d'entraînement à court-terme (Tang et al., 2015), ce qui met l'accent sur son efficacité quasi-immédiate en comparaison à d'autres interventions comme le MBSR. Dans une étude sur les effets de l'IBMT sur l'attention et l'autorégulation (Tang et al., 2007), les mesures d'attention exécutive sur l'ANT ont été récoltées auprès d'un groupe d'étudiants chinois aléatoirement sélectionnés et d'un groupe témoin ayant suivi une formation de relaxation musculaire, populaire en Occident. Cinq jours d'IBMT, à raison de 20 minutes par jour, ont induit une baisse d'anxiété, de dépression, de colère et de fatigue rapportées dans un questionnaire. Cela a été corroboré par une diminution significative du cortisol, l'hormone du stress, et une augmentation de la réactivité immunitaire (immunoglobuline A sécrétoire) dans ce groupe (Tang, 2011; Tang et al., 2007). Par ailleurs, des programmes plus longs en IBMT, i.e. 20 séances, ont également réduit le niveau de stress basal du cortisol et ont augmenté la réactivité immunitaire basale (Tang, 2017a; Tang et al., 2019). Considérés ensemble, ces résultats suggèrent que l'IBMT est à même

d'entraîner le bien-être psychologique, la cognition et la santé, à court-terme ou dans des protocoles plus progressifs (Tang et al., 2019). Malgré cela, les études mettant en lien les effets neurobiologiques et neurofonctionnelles de l'IBMT et les changements comportementaux ne sont pas nombreuses (Tang et al., 2019), notamment en comparaison au MBSR. De même, il est important de préciser que la majorité des recherches sur l'IBMT a été menée par Yi-Yuan Tang, actuellement professeur à l'université d'État de l'Arizona, et ses collaborateurs.

### **2.3.3. Les programmes basés sur la pleine conscience ont-ils des effets délétères ?**

Les recherches concernant les effets négatifs induits par des programmes basés sur la pleine conscience font souvent référence à des imprécisions méthodologiques (Baer et al., 2019). Néanmoins, des sensations de détresse et des altérations dans le fonctionnement quotidien ont été rapportées dans la littérature clinique et dans les études expérimentales sur la méditation de pleine conscience (Lindahl et al., 2021; Montero-Marin et al., 2022).

De manière générale, les effets secondaires adverses sont caractérisés comme tels lorsqu'ils ont une valence négative ou sont " subjectivement désagréables », ce préjudice variant en degré et durée, celle-ci mesurée sur un continuum, comme l'évoquent Britton et al. (2021) en référence aux critères établis par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 2010. Dans ce cadre, il est important de tenir compte des effets aboutissant à un progrès de la condition clinique mais qui entraînent, tout de même, des expériences négatives. Effectivement, bien que nécessaires ou attendues, ces nuisances doivent être considérées dans l'évaluation des coûts et des bénéfices de la pratique (Baer et al., 2019).

Plusieurs rapports scientifiques signalent une large panoplie d'effets secondaires des programmes basés sur la méditation de pleine conscience (e.g. Baer et al., 2019; Van Dam et al., 2018; Van Dam & Galante, 2020). Les effets indésirables les plus courants concernent principalement une aggravation de la dépression, de l'anxiété ou du sentiment de panique ; les douleurs corporelles, l'insomnie ; le déclenchement de souvenirs traumatiques, la dissociation et le dysfonctionnement exécutif, tel que la difficulté à effectuer des opérations

mentales (Cebolla et al., 2017; Farias et al., 2020). Ils touchent notamment des personnes dont la pratique méditative compte moins d'une heure par jour (Farias et al., 2020, pour une revue systématique). Similairement, des effets négatifs ont été rapportés récemment chez les élèves présentant des troubles de l'humeur existants ou émergents, caractérisés par une accentuation des pensées négatives (Montero-Marin et al., 2022). D'autres effets relèvent des mécanismes précis, e.g. le mécanisme d'engagement de la conscience corporelle a été associé à des sensations augmentées d'anxiété, de panique et de rumination mentale ; le mécanisme de changement de perception sur le soi a pu déclencher un émoussement affectif et une dissociation chez certains individus (Britton, 2019).

Dans une étude récente, Britton et al. (2021), ont évalué les effets délétères des programmes basés sur la pleine conscience en comparant trois variantes de la MBCT chez des personnes ayant manifesté l'envie de pratiquer la méditation afin de traiter les expressions cliniques ou infracliniques des troubles affectifs comme la dépression et l'anxiété. Toutes les interventions se sont déroulées à raison de trois heures par semaine pendant huit semaines, comptant une journée entière de retrait en silence. Des exercices au domicile ont été prescrits à raison de 45 minutes par jour, six jours par semaine. Un apprentissage spécifique sur la régulation des émotions et de l'humeur, en réponse à la demande première des participants, a eu lieu pendant les trois dernières semaines des trois programmes. Les résultats indiquent que près de 60 % de l'échantillon a présenté au moins un effet secondaire de valence négative, notamment l'anxiété, et ce indépendamment de la variante méditative. Cela suggère des expériences transitoires de détresse chez ce public, ce qui peut être aussi interprété comme la norme dans le processus thérapeutique. En revanche, le taux d'effets adverses durables, impactant la vie ou le fonctionnement de quelques jours à quelques mois, semble être similaire à celui d'autres traitements psychologiques (Britton, 2019; Lindahl et al., 2021).

Considérés ensemble, ces arguments mettent en exergue l'importance d'un cadre solide pour la pratique de la pleine conscience, avec des programmes validés et un monitoring constant des effets néfastes, qui peuvent survenir non seulement dans le domaine clinique.

## **2.4. Le contrôle inhibiteur et les mécanismes cognitifs dans la pleine conscience**

Les mécanismes en jeu dans la pleine conscience ont fait l'objet de diverses taxonomies (Brandmeyer et al., 2019; Hölzel et al., 2011; Shapiro et al., 2006; Tang et al., 2015). En s'appuyant sur des recherches précédentes (Carver & Scheier, 2011; Vohs & Baumeister, 2011), Hölzel et al. (2011) décrivent des composantes cognitives distinctes, mais en interaction, qui interviennent dans la pratique méditative. Selon ce construit, repris par diverses études (e.g. Schlosser et al., 2022; Tang et al., 2015), la méditation de pleine conscience inclut des mécanismes pour la régulation attentionnelle, la conscience de soi et la gestion des émotions. Ils se réunissent pour établir les bases de l'autorégulation.

Avant d'explorer les composantes cognitives en jeu dans la pleine conscience, il est nécessaire d'aborder la question critique concernant la convergence entre le concept d'attention et le CI. Il nous semble capital de défaire les nœuds entre ces deux construits afin d'éclairer les inconsistances sur la définition des tâches mesurant les effets cognitifs de la pratique méditative qui seront évoquées par la suite. Ces tâches concernent souvent des tests dits classiques d'inhibition (Diamond, 2013), e.g. la tâche de Stroop, considérée par certains auteurs comme une mesure d'attention sélective ou exécutive (e.g. Bench et al., 1993).

L'attention sélective recouvre particulièrement le CI (Posner & Driver, 1992; Weiss et al., 2018). Précisément, l'inhibition permet de contrôler l'interférence au niveau perceptif (Diamond, 2013; Grinspun et al., 2020), afin de se concentrer sélectivement sur l'objet d'intérêt et de supprimer l'attention vis-à-vis d'autres stimuli en temps réel (Posner & Driver, 1992). En outre, le CI joue un rôle capital dans le traitement sensoriel (Weiss et al., 2018) et la performance cognitive dans des tâches complexes d'attention sélective (Posner & Rothbart, 2007; Weiss et al., 2018).

Logan & Cowan (1984) indiquent que l'inhibition des réponses peut découler d'une interaction entre un système exécutif – qui permet un comportement flexible et dirigé vers un but, tout en bloquant les réponses qui ne sont pas pertinentes pour accomplir l'objectif – et un système dit subordonné, responsable pour exécuter les ordres supérieurs. Ce concept rejoint celui de Norman & Shallice (1986) sur le Système Attentionnel Superviseur, dans lequel

la plupart des actions en cours dépendent de l'activation de routines d'action qui demandent un faible contrôle attentionnel. Cependant, en cas de conflit entre ces routines, le système attentionnel met en place le gestionnaire des conflits, qui définit les priorités d'action et inhibe des routines concourantes en considérant le but à accomplir. Dans ce sens, et encore, le CI et l'attention se rejoignent.

Le CI peut donc opérer en plus ou moindre mesure via les sous-composantes attentionnelles (Dash et al., 2019), principalement en raison du rapprochement (non unanime) entre le concept d'inhibition et de contrôle cognitif (Aron, 2007), celui-ci rendant compte également les capacités d'attention (Braver, 2012).

Partant de ces postulats, nous avons constaté une récurrence des termes faisant référence à l'attention lorsque celle-ci renvoie, en fait, à la définition que nous avons employée pour l'inhibition. Il est possible que « inhibition » constitue un terme moins populaire dans les études en psychologie par influence du concept d'inhibition sociale, i.e. l'antagoniste de la facilitation sociale (Zajonc, 1965). Dans le cas des études sur la méditation, toutes les composantes décrites ci-dessous ont déjà été testées par des tâches classiques d'inhibition, i.e. le Stroop et le Go/noGo comme nous l'avons précédemment évoqué, mais le CI n'est que rarement mentionné en tant que soubassement cognitif pour ces processus psychologiques. De ce fait, si ces définitions se recoupent au long des sections suivantes, nous mettrons l'accent sur la place du CI, étant donné qu'il représente le terme soutenu dans le domaine de la cognition et constitue l'objet central de cette thèse.

Dans les sections suivantes, nous allons **d'abord présenter la composante cognitive** en jeu dans la pleine conscience ; parallèlement, nous allons **mettre en évidence la place du CI dans cette composante**, notamment – mais pas exclusivement – à travers les tâches utilisées pour mesurer des effets de la pratique méditative sur la composante en question.

### 2.4.1. Régulation attentionnelle

Comme nous l'avons cité précédemment, la régulation de l'attention est évoquée dans les pratiques anciennes de méditation de pleine conscience, telles que le « samatha » dans la tradition bouddhiste tibétaine (Lutz et al., 2007). Des exercices d'attention sélective, qui englobe l'attention focalisée (Azouvi, 2011), sont souvent proposés pour la relaxation, désignant une étape importante afin d'accéder à des états méditatifs plus soutenus (Kristeller, 2007). Dans cet exercice, l'individu pose son attention sur un seul objet – intérieur (e.g. la respiration) ou extérieur (e.g. un bruit) – ayant le conseil de reconduire calmement son attention sur l'objet en cas de distraction ou d'errance mentale (Lutz et al., 2008). La régularité de cette pratique peut prolonger la durée du maintien attentionnel (Barinaga, 2003) et augmenter la résistance aux distractions (Tang et al., 2015).

De nombreuses théories ont proposé des sous-composantes de l'attention. L'un des cadres théoriques les plus célèbres suggère que l'attention fait appel à trois réseaux neuronaux fonctionnellement distincts : l'alerte, indiquant l'attention soutenue ou vigilance ; l'orientation, comprenant notamment l'attention sélective, et l'attention exécutive, qui renvoie à la surveillance des conflits (Chiesa et al., 2011; Dash et al., 2019; Geva et al., 2013; McDowd, 2007; Posner & Rothbart, 2007). Plus précisément, l'alerte consiste à accéder et à garder un état de vigilance ; l'orientation régule et guide les ressources attentionnelles ; l'attention exécutive évalue les stimuli en compétition en privilégiant ce qui est nécessaire pour l'accomplissement de l'action souhaitée (Chiesa et al., 2011; Posner & Rothbart, 2007). Cette dernière est classiquement mesurée par la tâche l'Attention Network Test (ANT) (Fan et al., 2002). Des individus expérimentés à la méditation ont des taux d'erreurs plus faibles (Jha et al., 2007; van den Hurk et al., 2010) et des temps de réponse plus courts (Jha et al., 2007) que les personnes naïves dans cette tâche. De même, seulement cinq jours de pratique intensive de méditation de pleine conscience dans une formation d'IBMT, comme nous l'avons évoquée précédemment, peuvent optimiser la résolution des conflits dans cette tâche en comparaison à une technique de relaxation (Tang et al., 2007). Ces résultats ont été corroborés par l'étude de Kwak et al. (2020), dans laquelle des personnes ayant suivi une formation de quatre jours à la méditation présentent une amélioration des scores de conflit mesurés par l'ANT en comparaison à un groupe de relaxation.

Pozuelos et al. (2019) avancent qu'un entraînement de 3 semaines à la méditation de pleine conscience chez les adultes suscite des réponses moins impulsives à la tâche Go/noGo, mesurées par l'indice d'Impulsivité, en comparaison au groupe témoin. Ce résultat témoignant d'un meilleur CI est associé à une augmentation relative de l'amplitude du potentiel N2 centro-pariétal observée en Electroencéphalogramme (EEG) chez le groupe expérimental, ce qui peut refléter une meilleure sélection attentionnelle des caractéristiques pertinentes du stimulus d'intérêt (Moore et al., 2012). (Malinowski & Shalamanova, 2017) ont démontré que la pratique de la méditation de pleine conscience a amélioré la performance générale des adultes à la tâche de Stroop en comparaison au groupe de contrôle actif, i.e. la diminution des temps de réponse et l'augmentation des amplitudes du potentiel évoqué N2, ce qui suggère des progrès dans le maintien de l'attention focalisée, comme le définissent les auteurs. Dans cette même étude, la pratique méditative a réduit les temps de réponse dans une tâche Go/noGo et a augmenté les amplitudes du potentiel évoqué P3, spécifiquement lors des essais incongruents, reflétant à la fois l'efficacité du CI et un meilleur contrôle attentionnel. Moore et al. (2012) ont également rapporté chez l'adulte des changements du potentiel évoqué P3 pour les stimuli incongruents du Stroop, caractérisés par une augmentation de l'amplitude du P3 chez le groupe témoin, mais une diminution chez le groupe ayant suivi un programme de méditation. Le potentiel P3 dans la région temporo-pariétale fait part de l'activation des ressources attentionnelles employées dans la discrimination des stimuli perceptifs, celle-ci étant liée aux processus d'inhibition qui sont employés dans la gestion d'informations conflictuelles (Polich, 2007). Dans ce sens, la méditation de pleine conscience permettrait une allocation plus efficace des ressources cognitives, menant à une meilleure régulation attentionnelle.

Les résultats concernant l'impact de la méditation de pleine conscience sur les scores d'interférence du Stroop ne font pas consensus (Hölzel et al., 2011). Précisément, des études signalent l'absence d'effets après huit semaines de pratique de pleine conscience (Anderson et al., 2007) chez l'adulte naïf, ainsi que chez les personnes expérimentées en méditation (Josefsson & Broberg, 2011) en comparaison à des témoins, tandis que d'autres recherches indiquent un score d'interférence affaibli chez les individus expérimentés (Moore & Malinowski, 2009; Teper & Inzlicht, 2013).



## **2.4.2. La conscience de soi**

Dans cette sous-partie, nous distinguons deux aspects de la conscience de soi, i.e. la conscience corporelle, faisant notamment référence aux expériences sensorielles, et le changement de perception sur le soi, qui agit sur un niveau plus cognitif à partir de la méta-conscience. Nous détaillons également comment le CI intervient sur chaque sous-composante et les bases cérébrales impliquées dans ces processus.

### **2.4.2.1. La conscience du corps**

La conscience corporelle peut être définie comme la capacité à reconnaître les sensations corporelles subtiles (Hölzel et al., 2011; Mehling et al., 2009). Ce terme se réfère également à des symptômes présents dans les troubles de l'humeur, par exemple, pour décrire la focalisation exagérée sur les sensations physiques (Mehling et al., 2009). Dans le cadre de la méditation de pleine conscience, il renvoie aux expériences sensorielles vis-à-vis de la respiration, les émotions, la proprioception et intéroception (Hölzel et al., 2011; Tang et al., 2015). Dans les enseignements bouddhistes, la conscience du corps est l'un des fondements de la pleine conscience (Hölzel et al., 2011)

Les individus ayant suivi un cours de MBSR, tel que nous l'avons décrit précédemment, signalent une augmentation de la conscience corporelle, mesurée notamment par la sous-échelle « Observation » du FFMQ (Carmody & Baer, 2008). Dans cette sous-échelle, des items renvoient à la conscience des sensations corporelles (par exemple, Item 1 : "Quand je marche, je prends délibérément conscience des sensations de mon corps en mouvement."), ainsi qu'aux cinq sens et aux émotions (par exemple, l'item 15 « Je prête attention aux sensations, comme le vent dans mes cheveux ou le soleil sur mon visage » (Heeren et al., 2011).

Les preuves du raffinement de la conscience corporelle par la pleine conscience proviennent majoritairement de mesures auto-déclarées (Hölzel et al., 2011). En contrepartie, la sensation du rythme des battements cardiaques, qui constitue une mesure empirique pouvant rendre compte de la conscience intéroceptive, semble ne pas changer en fonction de la pratique méditative (Khalsa et al., 2008, 2020). Cependant, cette mesure n'est pas mise en

avant dans les témoignages des méditants vis-à-vis de la conscience corporelle, suggérant la nécessité des mesures plus adéquates pour considérer les effets de la pratique méditative sur cette composante cognitive (Hölzel et al., 2011). Par exemple, Philipp et al. (2015) avancent que l'acuité tactile de l'index droit a été améliorée de manière persistante par rapport au niveau de départ après seulement six heures de méditation focalisant sur la perception somatosensorielle de ce doigt.

#### **2.4.2.2. Le changement de perspective sur le soi**

Également appelé « conscience métacognitive » (Keng et al., 2011), « décentration » ou « re-perception » (Shapiro et al., 2006), le changement de perspective sur le soi évoque la méta-conscience, qui consiste à se placer en tant qu'observateur de ses propres pensées et ressentis, entraînant une modification de la propre perspective (Fall, 2016; Hölzel et al., 2011). La propre conscience est alors considérée comme un objet d'attention (Tang et al., 2015). La méta-conscience permet le détachement d'un soi statique (Schmidt & Walach, 2013; Varela et al., 1991) et engendre un soi observable, les méditants parvenant à le percevoir de manière plus dynamique et transitoire (Carmody et al., 2009). Par exemple, dans une analyse qualitative des annotations journalières des personnes participant à un cours MBSR pendant huit semaines, Kerr et al. (2011) ont constaté l'émergence d'un soi observateur indépendant de la valence des commentaires. La pratique de la pleine conscience génère donc des améliorations dans la représentation de soi, ainsi qu'une tolérance plus marquée envers les sources de stress (Emavardhana & Tori, 1997). De plus, les méditants rapportent une clarté plus importante vis-à-vis de leurs propres processus mentaux (MacLean et al., 2010) et une résolution temporelle plus aiguisée (Hölzel et al., 2011). Les scores sur une échelle de détachement de soi sont aussi plus élevés pour les méditants, ce concept assimilant la méta-conscience et l'impermanence des représentations mentales (Sahdra et al., 2010).

Parallèlement, Schooler (2002) s'est penché sur la métacognition (Jankowski & Holas, 2014; Nelson, 1996) pour aboutir au concept de changement de perspective de soi. Il décompose la pleine conscience en conscience métacognitive, i.e. la connaissance des faits généraux sur le fonctionnement mental ; la surveillance métacognitive, i.e. la surveillance des

processus cognitifs ; et le contrôle métacognitif, i.e. l'ajustement de la performance en fonction de ces connaissances. L'auteur a également distingué la surveillance non-consciente et consciente, celle-ci nommée méta-conscience (Schooler, 2002). La méta-conscience permet la détection du mind-wandering, par exemple, puisqu'elle implique l'attention aux contenus de sa propre pensée (Dunne et al., 2019).

Par ailleurs, ce changement perceptif s'appuie sur la flexibilité cognitive (Moore & Malinowski, 2009). Selon le modèle proposé par Garland et al. (2009) la posture métacognitive de la pleine conscience permet de se décentrer de l'expérience en exerçant la flexibilité cognitive. Dans ce sens, le désengagement de la réponse autocentrée requiert également le CI (Schuman-Olivier et al., 2020; Vago & David, 2012). La recherche expérimentale dans ce domaine étant à peine émergente (Tang et al., 2015), les données empiriques sur les fonctions exécutives en jeu dans la méta-conscience ne sont pas abondantes. Récemment, une étude a démontré le rôle médiateur de la flexibilité cognitive dans la corrélation négative entre la pleine conscience état, le stress et l'anxiété chez les enfants chinois, notamment par le biais de la décentration de soi (Wen et al., 2021).

### **2.4.3. La régulation émotionnelle**

La pratique de la pleine conscience est souvent associée à une meilleure régulation émotionnelle (Hölzel et al., 2011), celle-ci faisant référence à la modification des réponses affectives par le biais des processus adaptatifs de régulation (Ochsner & Gross, 2005). Cette régulation met en place deux stratégies, i.e. la réévaluation et l'exposition (Fall, 2016). La réévaluation permet d'attribuer un nouveau sens à l'expérience et en assimiler les connaissances, tandis que l'exposition consiste à faire face aux schémas mentaux tels qu'ils sont afin d'aboutir à l'acceptation et à la non-réactivité de ceux-ci via l'extinction et la reconsolidation (Fall, 2016; Hölzel et al., 2011). En invitant les méditants à affronter leurs pensées, qu'elles soient négatives ou positives, l'exposition répétée peut provoquer l'extinction des réponses conditionnées à l'instar de certaines techniques psychothérapeutiques (Chambless & Ollendick, 2001). Dans cette optique, Shapiro et al.

(2006) ont décrit un modèle dans lequel la pleine conscience engendre une altération importante à l'égard de l'expérience vécue, entraînant des changements dans l'autorégulation, l'acceptation, l'exposition et la flexibilité cognitive. La pratique méditative peut donc cibler l'une des cinq principales composantes de l'expérience émotionnelle, i.e. la situation elle-même, l'attention que la personne y porte, la manière dont la situation est perçue, ainsi que la réponse physiologique et comportementale (Kotsou et al., 2022).

Diverses approches attestent le lien entre la régulation émotionnelle et la méditation de pleine conscience, y compris les données expérimentales, l'auto-évaluation, les mesures physiologiques et les études en neuroimagerie. Par exemple, en comparaison à des individus inscrits dans un protocole de relaxation, des novices ayant suivi un programme de sept semaines de méditation de pleine conscience ont présenté une réduction significative de l'interférence émotionnelle, mesurée par le retard dans le temps de réaction face à des images affectivement chargées par rapport à des images neutres (Ortner et al., 2007). Encore dans cette étude, le temps d'expérience cumulée en méditation s'est accompagné d'une interférence émotionnelle atténuée en comparaison aux méditants moins expérimentés (Ortner et al., 2007). En outre, des données auto-déclarées indiquent que la méditation de pleine conscience réduit l'humeur négative (Jha et al., 2010), la distraction et la rumination mentale (Jain et al., 2007). La diminution de la réactivité face aux pensées répétitives est également rapportée par les questionnaires couvrant les effets immédiats d'interventions très brèves de gestion de stress par la pleine conscience (Feldman et al., 2010). Plus récemment, Wu et al. (2019) ont avancé des baisses importantes de la réactivité émotionnelle face à des stimuli négatifs et positifs, ainsi que la réduction du biais attentionnel vers les stimuli affectifs de valence négative – uniquement chez les individus suivant un programme hebdomadaire de méditation de pleine conscience en comparaison à des personnes inscrites à un cours d'éducation émotionnelle. Dans cette lignée, la pleine conscience trait est globalement associée à une moindre réactivité émotionnelle négative face aux sources de stress (Himes et al., 2021).

Il est important d'ajouter que la pratique méditative influence la régulation émotionnelle au niveau moteur. Récemment, Juneau et al., (2021) ont observé que la pratique méditative peut favoriser une diminution des tendances spontanées d'approche et d'évitement, évoquées par la valence émotionnelle positive ou négative des stimuli, respectivement.

La physiologie corrobore la diminution de la réactivité émotionnelle par la pratique méditative de pleine conscience, celle-ci facilitant aussi le retour à un niveau basal après confrontation avec des stimuli affectivement chargés (Hölzel et al., 2011). Ainsi, Goleman & Schwartz (1976) avancent que les méditants expérimentés présentent une conductance cutanée plus adaptée, caractérisée par un retour plus rapide au niveau plancher, en réponse à des stimuli aversifs en laboratoire. De même, Davidson et al. (2003) ont observé en EEG que le programme MBSR entraîne une augmentation de l'activation des zones antérieures de l'hémisphère gauche par rapport à un groupe témoin sur liste d'attente. Ce pattern d'activation a été précédemment associé à l'expérience des affects positifs chez les méditants par rapport aux non-méditants (Davidson et al., 2003). En utilisant aussi l'EEG, Jadhav et al. (2017) ont démontré chez un petit échantillon un changement significatif dans l'évaluation subjective, la réactivité émotionnelle, la puissance de l'asymétrie des électrodes et la précision de la classification des émotions après une intervention de méditation de pleine conscience de huit semaines. Dans une étude récente sur le projet ReSource (Favre et al., 2021), des adultes ont effectué des tâches de gestion émotionnelle en IRM fonctionnelle avant et après chaque module d'un programme de méditation. Chaque module s'est adressé à des aspects distincts de la pleine conscience, tels que l'attention et la conscience intéroceptive ; la compassion, et les compétences sociocognitives, comme la théorie de l'esprit. Les résultats indiquent que seul le module de la compassion a provoqué une diminution de l'affect négatif ressenti lors du traitement d'images véhiculant la souffrance humaine, s'accompagnant d'une activation accrue dans le gyrus supramarginal droit. Cela corrobore les effets spécifiques de la méditation ciblant la compassion sur la régulation émotionnelle.

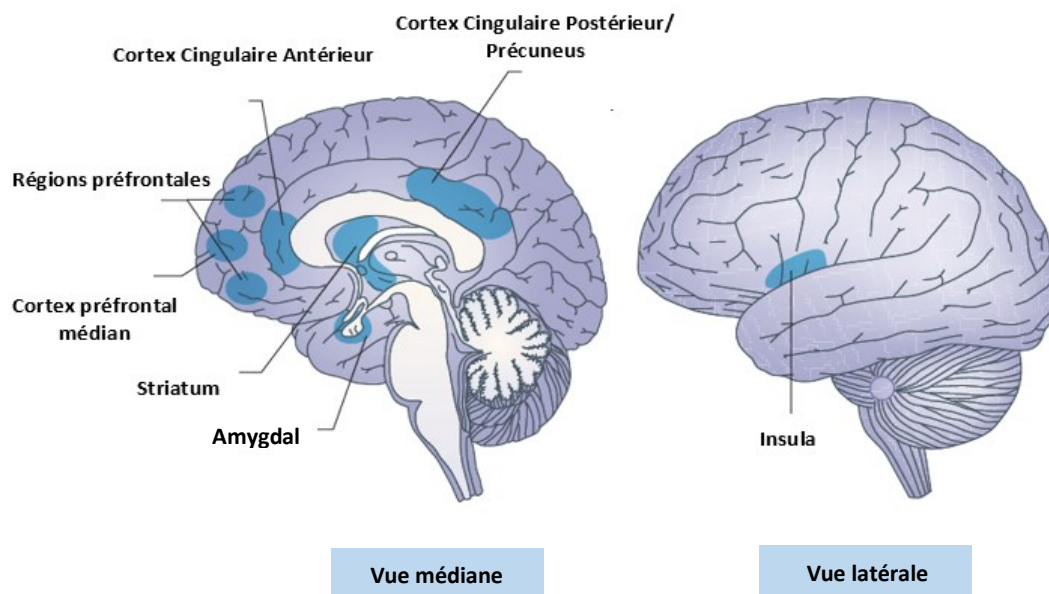
Ces résultats soutiennent les effets bénéfiques de la pratique méditative sur le traitement des émotions. Cela rejoint l'importance de l'inhibition pour la gestion émotionnelle, rappelant le rôle du CI chaud, comme nous l'avons décrit dans la première partie de l'Introduction. Effectivement, le CI participe à la régulation cognitive des émotions,

i.e. la capacité de renforcer, réduire ou suspendre intentionnellement une émotion (Langner et al., 2018). D'après une revue récente (Bartholomew et al., 2021), les capacités d'inhibition soutiennent une régulation émotionnelle efficace. Un exemple a été évoqué par Schmeichel & Tang (2015) sur le lien entre les temps de réponse au Stroop et les expressions faciales émotionnelles des participants confrontés à un stimulus social considéré aversif. Précisément, les personnes les plus performantes au Stroop ont été à même de mieux réguler leur expression faciale en affichant moins d'émotions négatives. Dans une autre étude, les meilleures performances à la tâche Stop Signal ont prédit de réponses émotionnelles moins intenses lors d'un rappel d'événements autobiographiques affectivement chargés (Tang & Schmeichel, 2014). Il est actuellement connu que le traitement émotionnel est lié au contrôle cognitif, e.g. le CI, car la manipulation de l'un influence les performances de l'autre et vice versa (Czapka et al., 2022; Pessoa, 2008).

En explorant le lien entre la pleine conscience, le CI et la régulation émotionnelle, Huang et al. (2020) ont évalué en IRM fonctionnelle l'effet d'une thérapie basée sur la pleine conscience (MBCT) sur le CI chez les personnes endeuillées. Les résultats indiquent une légère diminution de l'activité du réseau fronto-pariétal, accompagnée d'améliorations significatives des temps de réaction aux essais incongruents au Stroop, i.e. de meilleures performances inhibitrices. Les participants ont également rapporté des atténuations dans la sensation de deuil et le sentiment de dépression. En résumé, la MBCT a renforcé le CI en atténuant les interférences émotionnelles, facilitant donc la régulation des émotions.

## **2.5. Les mécanismes cognitifs dans la pleine conscience et les bases cérébrales**

Il est capital de souligner que les mécanismes cognitifs en jeu dans la pleine conscience présentent des bases neurales propres (Figure 10) et sont associés en plus ou moindre mesure aux FE, particulièrement au CI (Weiss et al., 2018), comme nous le détaillerons par la suite.



**Figure 10. Bases cérébrales de la méditation de pleine conscience ; adapté de Tang et al. (2015)**

### 2.5.1. Bases cérébrales de la régulation attentionnelle

De nombreuses recherches en neuroimagerie se sont penchées sur les bases cérébrales impliquées dans la méditation de pleine conscience, spécifiquement dans l'attention (Hölzel et al., 2011; Tang et al., 2015). Pour le réseau d'alerte, le système de noradrénaline dans le *locus coeruleus* est fréquemment cité ; pour l'orientation, les aires pariétales et frontales, notamment les champs visuels ; le réseau exécutif implique principalement les structures associées à la détection et résolution des conflits telles que le CCA, l'insula antérieure et les ganglions de la base (Posner et al., 2019; Posner & Rothbart, 2007; Tang et al., 2015).

Précisément, le CCA intervient dans le CI en détectant la présence des conflits lors du traitement de l'information (Botvinick et al., 2001; Spunt et al., 2012; Teper & Inzlicht, 2013). Durant la méditation de pleine conscience, l'activation du CCA permet de détecter les stimuli distracteurs et d'alerter les systèmes de régulation top-down afin de résoudre le conflit et promouvoir le maintien attentionnel (Carter & Veen, 2007; Hölzel et al., 2007). Associé à l'insula et aux régions frontales, le CCA fait également le relais entre plusieurs réseaux, mettant un place un contrôle exécutif optimal, notamment pour les tâches cognitivement exigeantes (Hölzel et al., 2011; Sridharan et al., 2008; Tang et al., 2015). Il est également important de rappeler que le CCA est une structure clef dans le réseau du CI, comme nous l'avons détaillé précédemment.

À l'aide des études en IRM fonctionnelle, Hölzel et al. (2007) ont observé que les adultes expérimentés en méditation avec attention focalisée présentent des activations plus importantes dans la partie rostrale du CCA en comparaison à des témoins appariés en âge, sexe et niveau d'études. Des activations accrues dans cette région ont été également rapportées chez les adultes sous un état méditatif en attente d'un stimulus électrique désagréable (Gard et al., 2012). De plus, ce pattern d'activation se reproduit dans le CCA rostral en état de repos chez les personnes ayant suivi une formation de cinq jours d'IBMT méditation de pleine conscience (Tang et al., 2009). Plus récemment, en utilisant la Spectroscopie de Résonance Magnétique (SRM), Tang et al. (2020) ont constaté une hausse du métabolisme de glutamate dans le CCA rostral après 10 heures d'engagement dans l'IBMT chez l'adulte, suggérant que ce bref entraînement modifie non seulement l'activité du CCA, mais provoque également des altérations neurochimiques dans les régions allouées pour le contrôle exécutif et l'autorégulation.

Bien que l'activation du CCA soit accrue lorsque le contrôle attentionnel est amélioré, un niveau d'expertise des capacités attentionnelles semble diminuer cette activation, probablement parce que la surveillance des conflits devient superflue étant donné le niveau de concentration atteint (Tang et al., 2015). C'est ce que montrent les résultats observés par Brefczynski-Lewis et al. (2007) chez les adultes ayant plusieurs degrés de pratique de méditation. Précisément, les chercheurs ont observé un pattern d'activation en forme de U inversé dans le réseau couvrant les régions cérébrales les plus sollicitées par l'attention soutenue, dont le CCA. Les activations ont été progressivement moins importantes chez les



individus selon l'accumulation d'heures d'expertise de méditation. En outre, les sujets les plus expérimentés ont exhibé des activations plus marquées que les novices dans les régions associées au CI, comme le GFI, en réponse à des sons distracteurs pendant la méditation, soutenant l'idée d'un processus inhibiteur plus robuste (Brefczynski-Lewis et al., 2007).

Les autres structures constituant le réseau attentionnel, telles que les ganglions de la base et l'insula, sont également affectées par la pratique méditative de la pleine conscience (Marchand, 2014). Par exemple, les méditants adultes présentent une activité réduite par rapport aux non-méditants dans les régions frontales médianes, temporales et les ganglions de la base lors des essais incongruents du Stroop, ce qui corrobore une amélioration de l'efficacité du CI et du contrôle attentionnel (Kozasa et al., 2012)

Outre les effets fonctionnels, la méditation de pleine conscience impacte l'anatomie cérébrale vis-à-vis des composantes cognitives. Pour la régulation attentionnelle, les données en IRM anatomique indiquent que l'épaisseur corticale du CCA est plus importante chez les méditants plus expérimentés que chez les novices (Grant et al., 2010). Dans une revue récente, Pernet et al. (2021) listent de nombreuses modifications induites par la méditation dans le volume et l'épaisseur de la matière grise du CCA, à l'instar de la différence volumétrique observée dans le CCA gauche chez les adultes addicts aux opioïdes ayant pratiqué la méditation dans le cadre de leur traitement en comparaison à des témoins (Fahmy et al., 2018). De surcroît, la pleine conscience trait est corrélée à un volume accru du CCA bilatérale (Lu et al., 2014).

Similairement, la méditation de pleine conscience affecte la matière blanche cérébrale (Tang et al., 2015; Y.-Y. Tang et al., 2012). La pratique de l'IBMT améliore l'anisotropie fractionnelle et réduit la diffusivité radiale dans les zones entourant le CCA chez l'adulte après un entraînement de quatre semaines, davantage que les témoins ayant suivi un programme de relaxation ; cela se traduit par une augmentation de la myéline et une amélioration de la connectivité structurelle (Tang et al., 2012). De plus, la pratique de l'IBMT pendant seulement 11 heures a suscité une augmentation de l'intégrité de la matière blanche dans le CCA dans un échantillon d'adultes (Tang et al., 2009). Laneri et al. (2016) avancent également que la méditation de pleine conscience contribue à la préservation de l'intégrité des fibres dans le CCA et l'insula, comme l'étaient les valeurs d'anisotropie fractionnelle plus élevées exhibées par les méditants expérimentés en comparaison aux témoins. Ces résultats contrastent avec

le déclin naturel observé chez le groupe contrôle, naïf à la méditation. Parallèlement, Tang et al. (2019) soulignent le rôle du rythme thêta sur la région frontale et la ligne médiane dans la plasticité de la matière blanche après la méditation de pleine conscience, ce rythme étant généralement associé au réseau du mode par défaut du fonctionnement cérébral (Campagne & Vercueil, 2013). Selon les auteurs, le rythme thêta indexe le contrôle nécessaire pour maintenir l'état méditatif et peut augmenter la prolifération d'oligodendrocytes, ce qui accroît la myélinisation et améliore la connectivité structurelle entre le CCA et les zones limbiques (Tang et al., 2019).

### **2.5.2. Bases cérébrales de la conscience corporelle**

Parmi les structures impliquées dans la conscience corporelle durant la pratique de la méditation de pleine conscience, l'insula et le cortex cingulaire postérieur (CCP) sont souvent mentionnés, associés à intéroception (Farb et al., 2007, 2013; Haase et al., 2016; Tang et al., 2009, 2015; Yu et al., 2022) et au traitement d'informations auto-référées (Yu et al., 2022; Zsadanyi et al., 2021 pour revue), respectivement.

L'insula présente une activation accrue pendant les exercices de conscience intéroceptive (Farb et al., 2013; Haase et al., 2016; Tang et al., 2009). De plus, son épaisseur corticale est plus importante chez les méditants expérimentés (Tang et al., 2015) et son volume local de matière grise corrèle avec la précision de la perception somatosensorielle (Hölzel et al., 2011). Récemment, Yu et al. (2022) ont examiné les spécificités de l'activité de l'insula chez les adolescents au cours d'un entraînement de pleine conscience par neurofeedback en IRM fonctionnelle en temps réel. Les auteurs ont constaté des activations augmentées dans la partie insulaire antérieure lorsque le neurofeedback était donné, mais une réduction des activations dans la partie postérieure. Ce contraste suggère l'implication de la région antérieure dans le traitement cognitif-affectif, tandis que la zone postérieure jouerait un rôle plus important dans les processus somatosensoriels, comme l'indiquent également Kurth et al.(2010). Ces résultats soutiennent que la méditation suscite des réponses distinctes en fonction des régions insulaires, fournissant des explications sur les résultats mitigés rapportés dans la littérature (Yu et al., 2022).

De même, une étude a signalé une connectivité accrue de l'insula droite avec les régions dorsolatérales du CPF chez des individus après un entraînement à la pleine conscience (Farb et al., 2007). Ce constat peut traduire un passage du traitement autoréférentiel vers une analyse plus objective des événements sensoriels intéroceptifs et extéroceptifs (Farb et al., 2007; Tang et al., 2015).

Parallèlement, les réductions d'activations dans le CCP sont souvent répertoriées dans la littérature sur la pleine conscience, comme le démontre une revue récente qui évalue près de 50 études sur la pratique méditative en utilisant la neuroimagerie (Zsadyani et al., 2021). Il est actuellement connu que le CCP est activé par le mind-wandering, i.e. l'errance des pensées indépendamment des stimuli (Brewer et al., 2013), ce qui sous-tend la diminution de son activité en tant que témoin d'une prise de conscience accentuée (Brewer et al., 2013; Koelsch et al., 2022; Tang et al., 2015; Yu et al., 2022). Le mind-wandering active un réseau dit « par défaut » (Default Mode Network), dont fait partie le CCP (Brandmeyer & Delorme, 2021; Kucyi, 2018; Yu et al., 2022). Des études en IRM fonctionnelle ont montré une activité relativement faible de ce réseau chez les méditants en comparaison aux témoins (Brewer et al., 2011), ainsi qu'un couplage fonctionnel plus important entre le CCP et le CPF dorsolatéral chez les méditants expérimentés au départ et durant la pratique méditative, ce qui peut traduire un contrôle cognitif renforcé sur le réseau par défaut (Brewer et al., 2011; Tang et al., 2015). En outre, cette région est aussi impliquée dans la conscience de soi, renvoyant donc à l'intéroception déclarée (Yu et al., 2022).

Les variations fonctionnelles dans le CCP sont également observables dans des tâches requérant le CI (Brewer et al., 2013). Eichele et al. (2008) ont observé que l'augmentation de l'activité du CCP prédit les erreurs de réponse dans la tâche Flankers, qui mesure l'inhibition de l'interférence. Cette hausse du signal peut refléter une fuite attentionnelle qui affecte la performance (Greicius et al., 2003), comme le constatent Li et al. (2008) lors des pics d'activation dans des essais précédant les erreurs à une tâche Go/noGo.

Au-delà des aspects fonctionnels, la diminution du volume de matière grise dans le CCP rend compte des déficits cognitifs et affectifs, à l'exemple des patients borderline (Hazlett et al., 2005). Similairement, une augmentation du volume de matière grise dans le CCP a été repérée chez les méditants expérimentés par rapport aux témoins (Fox et al., 2014). De même, une intervention brève de pleine conscience, i.e. 10 heures d'IBMT, influence la plasticité de

la matière grise, marquée par une augmentation du volume dans le CCP ventral (Tang et al., 2020). Le CCP jouant un rôle important dans la conscience corporelle, la conscience de soi, les émotions et la cognition, ces résultats mettent en avant la place de la méditation en tant que pratique protectrice contre les troubles de l'humeur et les déclin cognitifs.

### **2.5.3. Bases cérébrales du changement de la perspective sur le soi**

L'implication du réseau par défaut dans le changement de perception sur le soi ne fait pas consensus, mais est souvent citée dans la littérature (Tang et al., 2015). Ce réseau comprend les structures de la ligne médiane cérébrale, telles que le CPF médian, le CCP, le précunéus antérieur et le lobe pariétal inférieur (Raichle et al., 2001; Sajonz et al., 2010). Il a été démontré que le CPF médian sous-tend des capacités qui engagent le soi, y compris la connaissance réflexive sur soi (Lieberman et al., 2004). Le CCP et le précunéus sont activés lorsque les personnes évaluent la pertinence personnelle de stimuli, ainsi que leur intégration dans un contexte autoréférentiel (Northoff & Bermpohl, 2004). Par exemple, des activations dans le CCP et précunéus adjacent ont été rapportées lorsque les sujets fournissent des mots auto-descriptifs en comparaison à la description d'autrui (Northoff & Bermpohl, 2004).

Ces structures présentant des pics d'activation pendant le repos, le mind-wandering et lors des pensées détachées des stimuli, elles sont cotées pour intervenir dans les mécanismes par lesquels le soi est projeté dans une autre perspective (Buckner & Carroll, 2007). Des études en IRM fonctionnelle ont mis en avant le lien entre la pleine conscience et le réseau par défaut, soulignant une activité affaiblie dans le CPF médian et dans le CCP chez les méditants vis-à-vis des témoins, et ce pour différentes techniques de méditation (Brewer et al., 2011). Cela suggère une diminution du traitement autoréférentiel, soutenant par conséquent le changement de perspective de soi (Brewer et al., 2013; Brewer et al., 2011). En outre, Brewer et al. (2011) font état d'une connectivité fonctionnelle accrue entre le CCP, le CCA dorsal et le CPF dorsolatéral, ce qui signale que la connectivité du réseau du mode par défaut peut être affectée par la pratique de la méditation de pleine conscience.

Farb et al. (2007) ont exploré chez les individus ayant suivi une formation MBSR l'activité cérébrale pendant des exercices d'autoréférence, i.e. une tâche de focalisation narrative et une tâche de focalisation sur l'expérience, celle-ci proposant une expérience en première personne. Les participants ont affiché des activations plus importantes dans le CPF médian, le CPF latéral droit, l'insula droite, le cortex somatosensoriel et le lobe pariétal inférieur pendant la focalisation expérientielle par rapport à la focalisation narrative. De même, les analyses de connectivité fonctionnelle ont révélé un découplage de l'insula droite et du CPF médian, ainsi qu'une connectivité accrue de l'insula droite avec les zones dorsolatérales du CPF durant la focalisation expérientielle après l'intervention MBSR. Ces résultats sont interprétés en termes de changement de perspective de soi, étant donné que l'activation des régions préfrontales latérales étaye une analyse plus détachée et objective des événements (Farb et al., 2007).

Parmi les données anatomiques, Hölzel et al. (2011) indiquent une concentration accrue de matière grise dans le CCP, la jonction temporo-pariétale et l'hippocampe chez les individus ayant suivi une instruction MBSR. Comme l'hippocampe, la jonction temporo-pariétale, le CCP et certaines parties du cortex préfrontal médian constituent un réseau cérébral intervenant dans diverses expressions de la projection de soi (Buckner & Carroll, 2007), les modifications observées renforcent le postulat selon lequel la pratique de la pleine conscience entraîne un changement perceptif du soi (Hölzel et al., 2011; Northcut, 2017).

#### **2.5.4. Bases cérébrales de la régulation émotionnelle**

Au cours de la régulation des émotions, le système de contrôle situé dans le CPF module le fonctionnement du réseau émotionnel, celui-ci constitué des structures telles que l'amygdale, qui permet la détection des stimuli excitants, comme la peur (Ochsner & Gross, 2005). Dans le CPF, les régions dorsales sont impliquées dans l'attention sélective et la MdT ; les parties ventrales interviennent dans l'inhibition de la réponse ; le CCA participe notamment à la surveillance et la résolution des conflits ; et la région dorso-médiane joue un rôle dans la surveillance des états affectifs (Hölzel et al., 2011; Ochsner & Gross, 2007).

Il est important alors de souligner que le CI et la régulation émotionnelle partagent des mécanismes cérébraux communs (Bartholomew et al., 2021). Chez les individus qui régulent délibérément leurs réponses affectives, une augmentation de l'activation dans le CPF et une diminution de l'activation dans l'amygdale sont repérées (Harenski & Hamann, 2006). Kral et al. (2018) confirment que les méditants expérimentés affichent une moindre réactivité de l'amygdale aux images émotionnellement chargées, indépendamment de leur valence. Dans cette étude, les personnes naïves ayant participé à un programme MBSR ont présenté une diminution de la réactivité de l'amygdale par rapport aux témoins face aux images positives. En comparaison au groupe contrôle, la pratique méditative pendant huit semaines a également entraîné une augmentation de la connectivité fonctionnelle entre l'amygdale et le CPF ventromédian. La méditation a donc entraîné la diminution de la réactivité amygdalienne et l'augmentation de la connectivité entre cette structure et le CPF ventromédian durant la régulation automatique des émotions. Farb et al. (2007) ont également constaté une activité accrue dans le CPF ventrolatéral des personnes participant à un protocole MBSR, ce qui a été interprété comme une amélioration du CI. Ces conclusions suggèrent que les projections du CPF vers l'amygdale exercent une influence sur les capacités inhibitrices vis-à-vis des émotions (Hölzel et al., 2011). Etant donné le pattern des activations après les interventions de pleine conscience, il est aussi possible que la méditation implique la surveillance de l'excitation plutôt que la régulation à la baisse ou la suppression des émotions (Tang et al., 2015).

Du côté structurel, Hölzel et al. (2010) indiquent une corrélation significative entre les changements de stress perçu et les modifications dans la densité de la matière grise amygdalienne après huit semaines d'intervention MBSR. Plus bas était le niveau de stress, plus marquée était la diminution de la densité de matière grise dans l'amygdale droite. Parallèlement, Hölzel et al. (2008) ont rapporté que l'activation répétée de la zone hippocampique/parahippocampique pendant la pratique méditative s'accompagne d'une modification de la concentration de matière grise dans cette région chez les méditants, ce qui rejoint le rôle de l'hippocampe sur l'activité amygdalienne et conséquemment sur les processus émotionnels (Suzuki, 1996). Bien que plusieurs études révèlent des changements structurels en lien avec la méditation, leur implication dans la régulation émotionnelle doit être plus largement explorée (Tang et al., 2015).

## **2.6. Effets neurocognitifs de la pleine conscience durant le développement**

Cette sous-partie passe en revue des études sur les effets de la pratique de la pleine conscience chez les enfants et les adolescents. Ces périodes étant caractérisées par un développement marqué de l'autorégulation et des FE, elles peuvent constituer des moments particulièrement propices à cette pratique (Dunning et al., 2019b).

Il est important de souligner que de nombreuses recherches sur ces groupes d'âge se penchent sur les effets de transfert de la pratique méditative dans le cadre scolaire, de l'école maternelle au lycée (e.g. Ac et al., 2020; Amundsen et al., 2020; Creswell, 2017; Diamond, 2012; Flook et al., 2010; Georgiou et al., 2020; Gould et al., 2012; Kang et al., 2018; Liu, 2020; Liu et al., 2021; Lyons & DeLange, 2016; Napoli et al., 2005; Semple et al., 2010; van de Weijer-Bergsma et al., 2014). Il est attendu que les résultats bénéfiques de la méditation de pleine conscience s'appuient sur la maturation cérébrale afin de stimuler le développement des compétences cognitives de haut niveau, comme le CI (Allan et al., 2014; Diamond, 2012, 2013), qui influencent la réussite et le bien-être en milieu scolaire (Lyons & DeLange, 2016).

Comme nous l'avons expliqué précédemment, diverses études sur l'entraînement à la pleine conscience ont été critiquées pour leur manque de rigueur scientifique, notamment en ce qui concerne l'utilisation d'instruments d'auto-évaluation pour mesurer les changements comportementaux et l'absence d'études contrôlées randomisées afin de distinguer les effets spécifiques, i.e. les effets dus précisément à la pratique méditative, des effets non spécifiques découlant des variables intrinsèques et/ou confondues, telle que l'attente des participants (Chiesa et al., 2011; Chiesa & Malinowski, 2011; Dunning et al., 2019b). Bien que ces critiques soient toujours d'actualité (Dunning et al., 2019b; Tang et al., 2015), il convient de noter que les données soutiennent globalement les effets positifs de l'entraînement à la pleine conscience sur la santé physique et mentale (pour revue, voir Cillessen et al., 2019; Creswell, 2017).

De nombreuses recherches sélectionnent des cohortes couvrant une large tranche d'âge, e.g. 4 à 20 ans, afin d'évaluer l'efficacité des interventions basées sur la pleine conscience durant le développement. Par exemple, la méta-analyse de Zenner et al. (2014) sur des participants âgés de 6 à 19 ans, rapporte des bénéfices sur les mesures de cognition,

stress et résilience. Dans une méta-analyse sur des protocoles non-contrôlés, Maynard et al. (2017) ont repéré des changements positifs dans l'échantillon de 4 à 20 ans sur des compétences cognitives et socio-émotionnelles, malgré les tailles d'effet faibles. Aucun résultat significatif n'a été retrouvé pour les compétences scolaires.

### **2.6.1. Chez l'enfant**

Lyons & DeLange (2016) préconisent l'adaptation des interventions déjà existantes sur la pleine conscience au jeune public. Ces altérations servent à optimiser le contexte d'entraînement et incluent généralement la diminution de la durée des séances, l'augmentation du dynamisme des pratiques avec l'ajout de mouvements, ainsi que la restructuration du contenu afin de le rendre moins abstrait, donc plus accessible aux enfants et adolescents. Par exemple, une étude pilote de six semaines sur la faisabilité de l'apprentissage des techniques de pleine conscience aux enfants en milieu scolaire a permis de recommander son application dès l'âge de 7 ans (Semple, 2005). Il existe actuellement des programmes déjà adaptés pour les enfants, tels que MindUP (Schonert-Reichl & Lawlor, 2010) et les protocoles éducatifs des MAPs (Flook et al., 2010).

Linden (1973) a évalué les effets de l'entraînement à la méditation sur des aspects cognitifs et affectifs des enfants âgés de 8 à 9 ans. Bien qu'aucun effet sur les compétences en lecture ne soit rapporté, les jeunes participants ont exprimé des traits d'anxiété significativement plus faibles que les témoins appariés après 18 semaines du programme de méditation. Selon l'auteur, l'impact de la pratique méditative sur les états affectifs découle du changement de perspective sur le soi, alors décrit comme un déplacement attentionnel (Linden, 1973). En permettant le détachement d'un soi statique (Schmidt & Walach, 2013; Varela et al., 1991), le soi observable peut se percevoir de manière plus dynamique et transitoire, y compris pour les pensées et émotions (Carmody et al., 2009). En effet, des rapports cliniques et expérimentaux attestent que la pleine conscience peut contribuer au traitement des symptômes d'anxiété chez les enfants et les adolescents (Lee et al., 2008; Semple et al., 2010; Zylowska et al., 2008).



La thérapie cognitive basée sur la pleine conscience pour les enfants (MBCT-C) fait appel aux techniques de pleine conscience afin d'inciter le développement de la résilience socioémotionnelle par l'exercice de l'attention consciente et de la décentration (Semple et al., 2010). Dans un protocole contrôlé et randomisé, Semple et al. (2010) ont observé que les participants âgés de 9 à 13 ans ayant suivi le programme thérapeutique ont présenté des scores plus faibles que les témoins aux questionnaires sur les problèmes attentionnels. Ce résultat s'est maintenu dans un suivi différé, trois mois après l'intervention. Par ailleurs, la diminution des difficultés attentionnelles va de pair avec une amélioration globale des troubles du comportement, ceux-ci ayant notamment diminué chez les élèves dont les scores d'anxiété étaient cliniquement élevés au pré-test.

Dans une étude contrôlée et randomisée en milieu scolaire auprès d'enfants de 9 à 11 ans, Schonert-Reichl et al. (2015) ont comparé l'impact du programme MindUP, qui comprend des exercices de pleine conscience sur la respiration et l'écoute attentive, à un programme social basé sur la résolution des problèmes. Les résultats indiquent une amélioration significative du comportement prosocial des enfants ayant suivi le programme MindUp pendant quatre mois, en comparaison aux témoins. Il est important de noter que le comportement prosocial implique des actions volontaires, dirigées vers autrui dans une logique d'entraide (Jourdheuil & Petit, 2015). Il reposerait donc sur le CI dit chaud, qui sous-tend l'empathie, i.e. la capacité d'attribuer aux autres des états mentaux affectivement chargés, hétérocentrés (Draperi et al., 2022).

Dans cette optique, une méta-analyse a mis en évidence des améliorations du CI après la pratique de la méditation de pleine conscience chez les enfants (Takacs & Kassai, 2019), celle-ci étant plus efficace que les programmes qui entraînent spécifiquement les FE. La méta-analyse de Zenner et al. (2014) corrobore le caractère prometteur de ces interventions sur la cognition et les émotions, malgré les critiques méthodologiques tissées sur les études. Néanmoins, Koncz et al. (2021) ont souligné l'absence d'effets de la pratique méditative sur les capacités d'inhibition chez les enfants de l'école primaire. Ce constat peut s'expliquer par la durée non-adaptée des programmes qui exigent un engagement à long terme de jeunes participants. Cela évoque également la place de la motivation, dont le rôle est critique pour l'efficacité des entraînements cognitifs en général (Beauchemin et al., 2008; Bourgeois et al., 2016).

Outre les effets comportementaux, les enfants ayant suivi un entraînement basé sur la pleine conscience pendant huit semaines ont présenté une activation réduite de l'amygdale droite face aux visages exprimant la peur par rapport au groupe témoin, ce résultat étant associé à une baisse significative du stress rapporté (Bauer et al., 2019). De plus, l'entraînement à la pleine conscience a renforcé la connectivité fonctionnelle entre l'amygdale droite et le CPF ventromédian pendant la visualisation d'expressions faciales de peur, ce qui peut témoigner de la place consolidée du réseau exécutif sur le traitement émotionnel. Marusak et al. (2018) font aussi part d'un impact de la pleine conscience sur la connectivité dynamique entre le réseau émotionnel et le réseau exécutif chez les enfants et adolescents.

Du reste, la régulation des émotions rétrospectives a également fait l'objet d'une étude en neuroimagerie sur la pratique de la pleine conscience chez les adultes ayant été victimes de maltraitance pendant l'enfance (Joss et al., 2020). Dans le groupe expérimental, les altérations de volume de matière grise hippocampique ont été négativement associées aux changements de la perception du stress et de la dépression, suggérant les effets bénéfiques de la pleine conscience sur la structure cérébrale et la gestion des affects dans un échantillon adulte, marqué par des traumatismes anciens.

### **2.6.2. Chez l'adolescent**

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'adolescence est une période caractérisée par le décalage maturationnel entre les systèmes de contrôle et le réseau gérant les émotions (Casey et al., 2008; Ernst et al., 2019; Guyer et al., 2016; Luna et al., 2004; Steinberg, 2010). L'entraînement à la pleine conscience ayant démontré son efficacité dans la santé mentale des adultes, notamment en ce qui concerne le traitement émotionnel déficitaire (pour une méta-analyse sur des protocoles contrôlés et randomisés, voir Kuyken et al., 2016), l'adolescence est une étape particulièrement intéressante pour ces interventions, étant donné la vulnérabilité et l'émergence marquée des troubles à cette période (Dunning et al., 2019b). En effet, des études indiquent que ce déséquilibre à l'adolescence peut être atténué par des interventions soutenant les FE et l'autorégulation, comme la méditation de pleine conscience (Creswell, 2017; Tang et al., 2015).

Dans une étude longitudinale sur une cohorte de 108 adolescents, Tan & Martin (2015) ont observé une diminution significative de la détresse mentale des élèves instruits dans le protocole de pleine conscience par rapport au groupe contrôle, et cet effet a été renforcé lors du suivi différé à trois mois. Ce suivi a affiché une amélioration significative de l'estime de soi, de la pleine conscience, de la rigidité psychologique et de la santé mentale globale. De plus, il a été démontré que la pleine conscience présente un effet médiateur sur les résultats de santé mentale.

Cet effet sur la détresse mentale est particulièrement conséquent chez les élèves ayant des difficultés d'apprentissage, présentant souvent des niveaux d'anxiété et de stress scolaire plus élevés que leurs camarades typiques (Beauchemin et al., 2008). Ainsi, cinq semaines de méditation de pleine conscience administrée à des adolescents souffrant des troubles des apprentissages ont révélé une diminution de l'état d'anxiété, un renforcement des compétences sociales et une amélioration des résultats scolaires (Beauchemin et al., 2008). De même, Zylowska et al. (2008) ont testé la faisabilité d'un programme de pleine conscience dans un groupe restreint d'adolescents souffrant de TDAH. En évaluant les changements en pré et post-intervention, les auteurs ont avancé son caractère prometteur sur l'attention et l'inhibition cognitive. En contrepartie, Tharaldsen (2012) a fait part des résultats délétères obtenus auprès d'adolescents à la suite d'une intervention basée sur la pleine conscience. Il a été constaté que les participants ont subi une détérioration de la satisfaction de vie. Les auteurs ont débattu l'hypothèse d'une focalisation amplifiée des émotions gênantes en raison de l'attention portée au flot des pensées. Ainsi, il est possible que les adolescents ne soient pas toujours prêts pour les tâches cognitives complexes qui sollicitent des FE chaudes plus robustes, comme le CI chaud (Shapiro et al., 2006; Tharaldsen, 2012).

Effectivement, Oberle et al. (2012) ont exploré le lien entre le CI et la pratique méditative chez les jeunes adolescents. Ils ont constaté que les scores d'attention en pleine conscience corrèlent positivement avec les performances de CI. En outre, la pleine conscience est associée à une diminution des erreurs dans la tâche de Stroop et s'accompagne d'une diminution des comportements agressifs (Ron-Grajales et al., 2021). D'autres études chez les adolescents rapportent un effet positif de cette pratique sur la régulation des émotions évaluée par une réduction des perturbations émotionnelles (Kang et al., 2018; Schonert-Reichl & Lawlor, 2010). Récemment, Chen & Deng (2022) ont mis en évidence des potentiels évoqués distincts face aux visages de la version chaude du Stroop (Aïte et al., 2018) en fonction du

degré de pleine conscience trait chez les adolescents. Les auteurs ont conclu que la pleine conscience peut affecter précisément la surveillance précoce des conflits plutôt que leur résolution ultérieure, ce qui étend la compréhension sur les bases neuronales des effets de la pleine conscience sur le CI.

Du côté anatomique, peu de recherches se sont penchées sur les effets morphométriques de la méditation chez les adolescents (Yuan et al., 2020). Cette lacune représente une opportunité importante pour saisir les mécanismes régissant l'impact structurel de la pratique méditative sur le cerveau durant le développement (Giedd et al., 2015). Par exemple, une étude récente (Yuan et al., 2020) a rapporté une diminution significative du volume de la matière grise dans l'insula postérieure gauche, le thalamus gauche et le putamen gauche chez les adolescents à la suite de 12 semaines d'entraînement à la méditation. Ces résultats corroborent le constat sur les zones sollicitées par la pratique méditative. Cependant, il convient de noter que la littérature indique globalement des augmentations de volume de matière grise chez l'adulte ayant suivi un programme de méditation. Cette disparité peut être due aux spécificités maturationnelles du cerveau adolescent, ce qui corrobore la nécessité d'études portant sur le sujet.

## **2.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré les composantes cognitives de la méditation de pleine conscience, leurs bases cérébrales et les liens avec le CI. Nous avons présenté les principales interventions ayant la pleine conscience comme outil de changement cognitif, émotionnel et social, et leurs effets chez les enfants et adolescents typiques, qui constituent le public d'intérêt de cette thèse.

Répondre aux besoins des enfants et des adolescents, dans un monde de stimulation constante, constitue une préoccupation croissante dans les écoles (Dunning et al., 2019b). Bien que la robustesse des études sur la méditation de pleine conscience soit fréquemment discutée (Baer, 2003; Bishop, 2002; Dunning et al., 2019b; Tan, 2015), les interventions basées sur la pleine conscience semblent prometteuses pour améliorer la santé mentale, le bien-être et la cognition, notamment chez le jeune public dont la maturation cérébrale concède un potentiel plastique pouvant influencer le développement des capacités inhibitrices.

### 3. Objectifs et contributions de la thèse

Le CI est une fonction exécutive au cœur du développement cognitif et socio-émotionnel. De nombreuses études ont mis en avant son rôle dans l'acquisition et le raffinement de compétences complexes, comme les mathématiques (e.g. Blair & Razza, 2007; Roell et al., 2017, 2019, 2019; Viarouge et al., 2019). Le CI a été étudié à plusieurs niveaux, tels que le niveau cérébral, comportemental, physiologique et génétique. Ces facteurs interagissent également avec le gradient maturationnel du CI, qui se développe différemment en fonction du contexte dans lequel il intervient et du niveau de maturation cérébrale (e.g. Zelazo & Carlson, 2012). Dans cette optique, l'enfance et l'adolescence représentent donc des périodes sensibles du développement, conservant le potentiel plastique pour répondre à des interventions stimulant la cognition, comme la méditation de pleine conscience.

#### 3.1. Objectifs

L'objectif principal de cette thèse est de caractériser, chez l'enfant et l'adolescent, les effets de la pratique de méditation la pleine conscience sur les compétences du CI au niveau cognitif, cérébral et physiologique.

Ce travail s'appuie sur deux hypothèses. Premièrement, la méditation de pleine conscience modifie la cognition différemment en fonction de l'âge. Les effets de la méditation de pleine conscience seraient particulièrement efficaces dans le contexte du cerveau en développement du fait d'échanges dynamiques entre l'apprentissage et la maturation des régions cérébrales (Galván, 2010). Dans ce sens, il est attendu que la pratique méditative suscite des effets spécifiques aux différentes dimensions du CI en fonction de leurs trajectoires développementales (Aïte et al., 2018; Prencipe et al., 2011; Zelazo & Carlson, 2012). Deuxièmement, nous faisons l'hypothèse que les différences interindividuelles concernant l'efficacité et les changements liés à la pratique la pleine conscience sur le CI dépendent de facteurs neurodéveloppementaux et de marqueurs physiologiques impliqués dans le CI (voir Jolles & Crone, 2012).

Afin de tester ces hypothèses, nous nous appuyons sur le projet APEX (APprentissages Exécutifs) mené au laboratoire, qui vise à évaluer l'impact différents entraînements cognitifs, dont la méditation de pleine conscience chez l'enfant et l'adolescent, selon une approche classique de psychologie expérimentale avec un pré-test et un posttest. Ce projet propose un riche ensemble des données multimodales – à la fois comportementales, génétiques, physiologiques, neurofonctionnelles et morphométriques (cf. détails dans le chapitre suivant).

Nous testerons ces différentes hypothèses à travers trois études. La **première étude** s'adresse aux effets de la pratique de la méditation de pleine conscience sur les capacités de CI en analysant spécifiquement les dimensions cognitive (neutre) et émotionnelle (chaude) du CI chez les mêmes participants et dans une perspective développementale. Cette étude, pionnière à notre connaissance, compare les effets sur le CI neutre et chaud après cinq semaines de pratique de la méditation de pleine conscience par rapport à l'entraînement cognitif qui cible directement le CI. Pour cela, 129 participants en bonne santé, dont 66 enfants d'âge scolaire (9 à 10 ans) et 63 adolescents (15 à 17 ans) ont été évalués en pré et post-intervention. Nous anticipons des effets plus marqués de la pratique de méditation de pleine conscience par rapport à l'entraînement cognitif (Koncz et al., 2021; Oberle et al., 2012; Sahdra et al., 2011), avec des effets spécifiques selon les différents stades de développement du CI neutre et chaud (Aïte et al., 2018; Prencipe et al., 2011; Zelazo & Carlson, 2012).

Dans la **deuxième étude**, nous évaluerons l'importance des mesures physiologiques, i.e. le taux de glycémie sanguine sur le CI. Pour cela, nous avons étudié les données de 91 adolescents du projet APEX. Nous faisons l'hypothèse que les participants présentant des taux de glycémie plus élevés sont plus performants aux tâches mesurant le CI (Feldman & Barshi, 2007; Sakowski et al., 2020).

Dans notre **troisième étude**, l'objectif est d'analyser l'effet à long terme du développement cérébral fœtal sur l'efficacité du CI. Nous analyserons les sillons corticaux, mesures indirecte des événements précoces du développement cérébral (Cachia et al., 2021a). Nous nous intéressons à une région corticale clef du réseau du CI, intervenant aussi activement dans la méditation de pleine conscience, à savoir le cortex cingulaire antérieur (CCA). Cette région présente deux types de motifs sulcaux qualitativement distincts, stables dans le temps et facilement catégorisables selon la présence ou l'absence du sillon paracingulaire (Leonard et al., 2009; Ono et al., 1990; Tissier et al., 2018). Ainsi, nous avons

labellisé le CCA dans les deux hémisphères cérébraux de 196 participants du projet APEX, dont 105 enfants d'âge scolaire (9 à 10 ans) et 91 adolescents (15 à 17 ans) afin d'évaluer le lien entre ces motifs sulcaux et l'efficacité du CI. En accord avec la littérature évoquée ci-dessus, nous anticipons de meilleures performances inhibitrices chez les personnes ayant des motifs asymétriques du CCA en comparaison à celles présentant des motifs symétriques, et cela, chez les enfants et les adolescents.

### **3.2. Contribution**

L'étude des effets de la méditation de pleine conscience sur le CI – une fonction exécutive basale et essentielle pour le développement cognitif et socio-émotionnel – pourrait se transférer dans plusieurs sphères, en particulier les compétences personnelles et sociales (« soft skills ») mais également la performance académique, la santé mentale et le bien-être en milieu scolaire. La grande hétérogénéité de la littérature à propos des effets de la méditation de pleine conscience sur le CI nous conduit à considérer l'ensemble des facteurs - e.g. neurodéveloppementaux, physiologiques, comportementaux - qui modulent l'efficacité du CI et qui pourraient également influencer son amélioration via la pratique de la méditation. Cette thèse vise donc à comprendre les différences interindividuelles associées à ces facteurs, dans une perspective éducative axée sur l'amélioration de capacités psychologiques fondamentales, telle la régulation des émotions. Celle-ci est particulièrement importante pour l'adolescence puisque cette période de développement est caractérisée par une régulation des émotions déficiente, pouvant déclencher de mauvaises capacités de prise de décision (Aïte et al., 2018; Chein et al., 2011; Dahl, 2004).

### 3.3. Le projet APEX

Le cerveau humain est un organe plastique, capable d'apprendre et de s'adapter à son milieu (Posner & Rothbart, 2005). Cet apprentissage est sous-tendu par les différents niveaux du vivant, à savoir moléculaires (génétique), cellulaires (neurotransmetteurs), macroscopiques (réseaux neuronaux) et environnementaux, ceux-ci combinant des éléments chronologiques, pédagogiques, socio-économiques et culturels. La connaissance de ces facteurs inspire le rapprochement entre les neurosciences et l'éducation, encourageant une fine évaluation des interventions pédagogiques qui sont plus à même d'étayer l'apprentissage. Les techniques en neuroimagerie favorisent une compréhension approfondie des difficultés typiques rencontrées, notamment dans le contexte scolaire, ainsi que la réflexion sur les moyens de les surmonter (Houdé & Borst, 2018).

Compte tenu des arguments exposés précédemment, il est possible d'améliorer le CI par un certain nombre d'entraînements, e.g. la méditation de pleine conscience, les programmes scolaires, un entraînement informatique, entre autres (Diamond, 2012; Diamond & Lee, 2011a; Karbach & Kray, 2009; Posner et al., 2013; Pozuelos et al., 2019). Néanmoins, les paramètres de cet entraînement se heurtent à un ensemble de défis. Par exemple, un entraînement efficace au CI exige une exécution répétée et une augmentation progressive de la difficulté (Thorell et al., 2009) afin de maintenir également la motivation des participants (Beauchemin et al., 2008; Karbach, 2008). Ces défis concernent également la mise en place d'un groupe de contrôle actif et d'une exploration multimodale, ces points étant souvent critiqués dans les études sur la pratique de la pleine conscience (Baer, 2003; Bishop, 2002; Tang et al., 2015). Par ailleurs, si de nombreuses études se sont focalisées sur l'entraînement exécutif de l'enfant d'âge préscolaire et scolaire (Diamond & Lee, 2011a; Dowsett & Livesey, 2000; Houdé et al., 2011; Liu et al., 2015; Thorell et al., 2009), l'aspect développemental est cependant moins exploré. En effet, certaines périodes sont plus à même de répondre à l'entraînement cognitif en raison de leur grande plasticité, comme l'enfance et l'adolescence (Karbach, 2008; Morishita & Hensch, 2008).

Considérant tous les éléments ici exposés, il est envisageable de tester les effets de la méditation de pleine conscience sur le contrôle exécutif de manière multimodale, sous la forme d'un entraînement informatique, en comparaison à un groupe de contrôle actif. A notre connaissance, **aucune étude n'a actuellement évalué – aux niveaux cérébral, cognitif et**



## **biologique– l'apprentissage au contrôle exécutif à travers la méditation de pleine conscience durant l'enfance et l'adolescence.**

Cela établit les bases du projet APEX, pour « APprentissages Exécutifs », qui englobe des interventions effectuées chez les enfants et les adolescents, financé par l'ANR pour 5 ans (2015-2019) et approuvé par trois comités d'éthique (CPP Enfant : ID-RCB 2015-A00383-46 ; CPP APEX Ado : ID-RCB 2015-A00811-48 ; CPP APEX Ado 2 : RCB 2018-A03203-52). APEX est un projet de recherche fondamentale conjuguant psychologie expérimentale et neurosciences, réalisé à Caen pour les enfants, et à Paris pour les adolescents, sur deux périodes distinctes (2017-2018 et 2019-2020). Cette dernière concerne spécifiquement l'ajout de la branche « pleine conscience » au groupe d'adolescents, dont la mise en place, le recrutement et l'acquisition de données ont été menés dans le cadre de cette thèse.

Le projet APEX vise à évaluer, chez des enfants d'âge scolaire (9-10 ans) et des adolescents (16-17 ans) volontaires sains, l'impact de deux apprentissages exécutifs – i.e. un entraînement ciblant le CI et un entraînement exerçant le CI via la méditation de pleine conscience (ici abrégée PC) en comparaison à un groupe de contrôle actif (CA) (Klingberg, 2010). Il s'agit de fournir une vue multimodale sur ces entraînements informatisés, à l'aide de l'imagerie cérébrale (IRM), des analyses génétiques, des échantillons de glycémie sanguine et des épreuves cognitives informatisées, appariées pour l'âge, selon une approche neuroconstructiviste dans le but de modéliser les dynamiques multidimensionnelles du développement (Barker & Munakata, 2015; Johnson & Munakata, 2005; Thomas et al., 2014). Le projet APEX présenté dans cette thèse adresse les questions citées ci-dessous, pour lesquelles nous formulons des hypothèses qui rejoignent celles de la thèse, déjà évoquées :

- A. Est-il possible d'entraîner le CI via la méditation de pleine conscience chez l'enfant (9-10 ans) et l'adolescent (16-17 ans) ? Si oui, le gain est-il significativement plus important chez les participants ayant suivi un entraînement ciblé sur le CI que chez les enfants ayant suivi la méditation de pleine conscience, et cela par rapport à un groupe de contrôle actif (CA) ?

Nous soutenons l'hypothèse (**H1, générale**) selon laquelle il est possible d'entraîner le CI via la méditation de pleine conscience (PC) chez les enfants et les adolescents. L'apprentissage à la PC serait d'autant plus important que celui engendré par l'entraînement ciblé sur le CI (Takacs & Kassai, 2019).

- B. L'apprentissage cognitif a-t-il un effet équivalent chez les enfants et les adolescents ou, au contraire, est-il soumis aux spécificités des trajectoires développementales ? Dans cette optique, le type d'entraînement (ciblé sur le CI ou via la PC) a-t-il un effet différent selon (1) l'âge des participants et (2) le type de CI exercé ?

Nous faisons l'hypothèse **(H2)** des effets spécifiques de l'entraînement selon l'âge des participants, et ce en raison de différents stades de développement du CI neutre et chaud (Aïte et al., 2018; Prencipe et al., 2011; Zelazo & Carlson, 2012). Plus précisément, l'entraînement ciblant le CI devrait améliorer les capacités de CI froid, tandis que la PC devrait améliorer le CI chaud, notamment à l'adolescence de par l'hypersensibilité émotionnelle de cette période.

- C. Le taux de glycémie influence-t-il l'efficacité du CI ? Y a-t-il dépendance du biotype, i.e. l'indice de masse corporelle ?

Nous faisons l'hypothèse **(H3)** d'un effet de la glycémie sur l'efficacité du CI, les personnes les plus performantes présentant des taux de glycémie plus élevés, tout en restant proches de l'euglycémie (i.e. 3,5 mmol/L à 7,8 mmol/L). Nous anticipons que cet effet soit modulé par l'indice de masse corporelle (Marioni et al., 2016).

- D. Les motifs sulcaux du CCA influencent-ils l'efficacité du CI, au-delà de l'âge ?

Déterminés durant la vie fœtale et stables par la suite (Cachia et al., 2021b), les motifs sulcaux du CCA imposent une contrainte neurodéveloppementale précoce sur le CI durant le développement, avec ~20% de la variance de l'efficacité inhibitrice expliquée par l'asymétrie des motifs sulcaux du CCA chez l'enfant de 4 ans (Cachia et al., 2014) et 9 ans (Borst et al., 2014). Nous posons ainsi l'hypothèse **(H4)** selon laquelle l'efficacité du CI dépendrait en partie de contraintes neurodéveloppementales précoces fixées par la morphologie sulcale. En cohérence avec la littérature, nous nous attendons à des performances plus efficaces du CI chez les enfants et les adolescents ayant des motifs asymétriques du CCA par rapport à ceux présentant des motifs symétriques (Cachia et al., 2021b; Tissier et al., 2018), et ce indépendamment de l'âge.

# 4

## CHAPITRE

APprentissages EXécutifs  
chez l'enfant et l'adolescent

## Partie 2 – Protocole expérimental

---

### **4. Méthode APEX**

#### **4.1. Recrutement**

Le projet APEX, qui englobe des interventions effectuées chez les enfants et les adolescents, a été financé par l'ANR pour 5 ans (2015-2019) et approuvé par trois comités d'éthique (CPP Enfant : ID-RCB 2015-A00383-46 ; CPP APEX Ado : ID-RCB 2015-A00811-48 ; CPP APEX Ado 2 : RCB 2018-A03203-52).

##### **4.1.1. Chez l'enfant**

Cent cinq enfants âgés de 9 et 10 ans ont été recrutés dans les écoles élémentaires publiques et privées de la ville de Caen et ses alentours par le biais du partenariat entre le LaPsyDÉ et les établissements scolaires dans le Calvados. Les stratégies de recrutement ont inclus la présentation du projet APEX Enfant (PI : Pr. Grégoire Borst) auprès d'une vingtaine d'écoles, ainsi que la distribution d'affiches dans la région caennaise, notamment lors des événements d'ordre scientifique tels que la Fête de la Science. Lors de ce recrutement, un groupe supplémentaire d'enfants nés grands prématurés a été formé pour une étude parallèle, APEX Préma (PI : Pr. Bernard Guillois, service de Néonatalogie, CHU de Caen).

Les titulaires de l'autorité parentale ont été communiqués de la possibilité que leur enfant intègre le projet APEX à travers une lettre adressée par les professeurs des écoles, en accord avec le directeur d'établissement. Par la suite, des réunions à l'attention des élèves concernés et de leurs familles ont été préparées dans les écoles primaires. Les jeunes candidats et leurs parents ont également reçu un livret informatif (Figure 11). Ces réunions ont été animées par les membres de notre équipe basée à Caen, conviant les enfants, les parents, les directeurs d'établissement et les professeurs après la journée de classe. De nombreux questionnements ont émergé de ces échanges, notamment en ce qui concerne

l'utilisation de l'IRM en recherche fondamentale. Une présentation dynamique sur les études en neuroimagerie menées au sein du LaPsyDÉ a permis d'illustrer les différentes étapes des protocoles en IRM de façon adaptée à l'enfant, rassurant ainsi le public sur les fausses idées concernant les risques encourus. Un entretien individualisé d'environ 45 minutes a été alors proposé pour ceux réaffirmant leur intérêt à participer.



**Figure 11.** Livret d'information version enfant (à gauche) et version parent (à droite) dans APEX Enfant.

#### 4.1.2. Chez l'adolescent

Quatre-vingt-onze adolescents âgés de 16 et 17 ans (18 ans moins deux mois) ont été recrutés dans les lycées publiques et privés de Paris et région parisienne, à travers le partenariat entre le LaPsyDÉ et les trois Académies d'Ile-de-France. Soixante adolescents ont été recrutés entre 2016 et 2017 pour le projet APEX Ado (PI : Arnaud Cachia) pour les groupes d'entraînement CA et CI. Trente-et-un adolescents ont été recrutés entre 2019 et 2020, spécifiquement dans le cadre de cette thèse, pour la branche APEX Ado 2 (PI : Arnaud Cachia) afin de constituer le groupe PC.

Des réunions d'information ont été organisées à l'attention des lycéens dans les établissements scolaires, avec l'aide des directeurs et professeurs concernés (Figure 12). Avec Arnaud Cachia, coordinateur scientifique du projet, une présentation interactive et vulgarisée à propos de la recherche en neuroéducation ainsi que du projet APEX Ado ont été proposés.



**Figure 12.** Réunion d'information pour APEX Ado 2 dans un lycée parisien.

Les lycéens intéressés ont rempli un formulaire avec leurs coordonnées, constituant ainsi une liste de participants potentiels que nous avons contactés par la suite. Cet échange ultérieur avec le candidat, par mail ou téléphone, avait pour but de (1) expliquer en détails l'organisation pratique du projet ; (2) confirmer son intérêt et garantir l'accord des deux parents/tuteurs pour sa participation ; (3) vérifier les critères d'inclusion et d'exclusion auprès du candidat. Dans le cadre d'APEX Ado 2, la pandémie de Covid-19 a imposé non seulement le report des passations jusqu'à l'assouplissement des mesures sanitaires, mais aussi l'adaptation des moyens de recrutement. Nous avons ainsi élaboré une plaquette d'information (Annexe 3), suffisamment succincte et ludique, qui a été rediffusée par mail auprès de plusieurs lycées par les biais des directeurs et d'enseignants (extrait en Figure 13). De plus, il n'était pas exclu que certains adolescents ou parents/tuteurs soient informés de l'étude par le biais de leur réseau personnel, auquel cas la procédure de contact s'est déroulée directement auprès d'eux.

Lors des réunions d'information, pour les enfants et les adolescents, il a été précisé que les volontaires avaient le droit d'interrompre leur participation à la recherche à tout moment, la demande provenant du participant lui-même et/ou de leurs parents, et qu'elle qu'en soit la raison. Enfin, en suivant la loi informatique et libertés et la loi n°2002-303 du 4 mars 2002, le participant était informé de son droit d'accès et de rectification aux données recueillies.

**Projet de recherche : apprentissage au contrôle cognitif à l'adolescence**

Le Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS) recherche des adolescents âgés de 16 et 17 ans pour participer à une recherche fondamentale afin de mieux comprendre comment le cerveau apprend. C'est une occasion pour l'adolescent de découvrir le monde de la recherche scientifique sur un sujet passionnant : son propre cerveau !

La participation à cette recherche est entièrement libre et volontaire. Ce projet a été validé par le comité d'éthique d'Ile-de-France. A la fin de l'étude et en échange de leur participation, les adolescents se verront remettre 100 € bons cadeaux.

La réalisation de ce projet n'empiètera pas sur le temps scolaire car il se fera en dehors du lycée : à la maison pour l'apprentissage et sur la plateforme d'imagerie pour l'IRM et la caractérisation cognitive.

**Quel est le but de cette recherche ?**

L'objectif de ce projet est de mieux comprendre les changements survenant dans le cerveau des adolescents lors d'un apprentissage cognitif. Nous utilisons l'imagerie par Résonance Magnétique (IRM) car cette méthode permet d'étudier de manière non invasive et indolore les changements dans le cerveau lors de l'apprentissage, nous nous focalisons sur le contrôle cognitif, un ensemble de fonctions cognitives du cortex préfrontal, à l'avant du cerveau, qui permettent l'utilisation au cas par cas des meilleures stratégies pour résoudre au mieux un problème. Ces fonctions sont étroitement associées à la réussite scolaire et professionnelle. Elles connaissent un développement tardif jusqu'à la fin de l'adolescence et sont donc susceptibles de s'améliorer par l'effet d'un apprentissage cognitif.

**En quoi consiste la recherche ?**

L'objectif de ce projet est simple : tester en IRM chez des adolescents l'impact au niveau cérébral et neurocognitif d'un apprentissage intensif au contrôle cognitif.

Chaque participant aura à réaliser chez lui, pendant un mois, un apprentissage cognitif sur une tablette tactile (fournie pour le projet). Chaque adolescent passera également un examen d'IRM et une caractérisation cognitive, avant et après l'apprentissage.

**Comment la recherche se déroule-t-elle ?**

Une classe d'apprentissage passera un premier examen de caractérisation cognitive ;  
 : 25 sessions d'apprentissage sur une tablette numérique de 15 minutes ;  
 passeront un second examen de caractérisation cognitive.

Les examens IRM et les caractérisations cognitives auront lieu sur la plateforme d'imagerie cérébrale de l'Université Paris Descartes (75014 Paris. M<sup>o</sup> Alésia ou M<sup>o</sup> Glacière).

de au développement de la recherche, afin de la re à combiner l'étude ale du développement de l'enfance et de l'adolescence.

**CONTACT :**  
 @parisdescartes.fr  
 e@parisdescartes.fr

ment et de l'Éducation

Figure 13. Extrait de la plaquette d'information d'APEX Ado 2.

### 4.1.3. Critères d'inclusion et d'exclusion

Nous avons restreint la tranche d'âge aussi bien pour les enfants que pour les adolescents afin de limiter les effets de l'âge sur le CI (Diamond, 2013) et sur l'anatomie cérébrale en raison des mécanismes neuroplastiques très présents durant ces périodes (Casey et al., 2005; Shaw et al., 2006). Nous nous sommes donc focalisés sur des enfants âgés de 9 à 10 ans et des adolescents de 16 et 17 ans (jusqu'à 18 ans moins 2 mois avant le début de l'inclusion dans l'étude). Chez les enfants, le choix de cette tranche évoque les compétences scolaires déjà acquises et maîtrisées, telles que la lecture et les opérations mathématiques basiques ; chez les adolescents, ces âges impliquent une sensibilité accrue aux facteurs environnementaux (Moffitt et al., 2011), étant donné l'apparition de nombreux troubles psychiatriques comprenant des déficits d'inhibition, tels que la schizophrénie, le trouble bipolaire ou les addictions à ce moment (Ballageer et al., 2005; Fairchild et al., 2009; Stevens et al., 2014).

Parmi les critères d'inclusion, il a été demandé que les participants soient scolarisés en accord avec leur âge (CE1 ou CE2 pour les enfants ; 2<sup>nde</sup>, 1<sup>ère</sup>, Terminale, voire première année à la faculté pour les adolescents). Tous les enfants étaient scolarisés dans un établissement de langue française au moins depuis le CP. Pour APEX Enfant, les jeunes participants étaient nés à terme, la grossesse ayant eu une durée supérieure ou égale à 37 semaines d'aménorrhée.

Enfants et adolescents avaient une préférence manuelle droite, avec un minimum de 40% au test d'Edinburg (Oldfield, 1971). Leurs examens médicaux, neurologiques, psychiatriques et neuroradiologiques devaient être normaux, ce critère étant attesté pendant la visite médicale d'inclusion qui sera détaillée par la suite.

Les consentements libres, éclairés et exprès ont été envoyés au domicile des candidats potentiels afin de leur accorder le temps de réfléchir à propos des objectifs de la recherche, du déroulement et de la durée de l'étude, ainsi que les bénéfices, les risques potentiels, les contraintes et les enjeux éthiques couverts par le Comité de Protection des Personnes (CPP). Ces documents comprenaient les deux volets de l'étude, à savoir « Imagerie cérébrale » et « Génétique ». Les deux volets étant détachés, l'inclusion dans l'étude était assurée par la signature du premier. Ainsi, la participation au protocole génétique était optionnelle, la



décision ne compromettant pas la participation au projet APEX. En cas de refus, les échantillons de salive n'ont pas été prélevés.

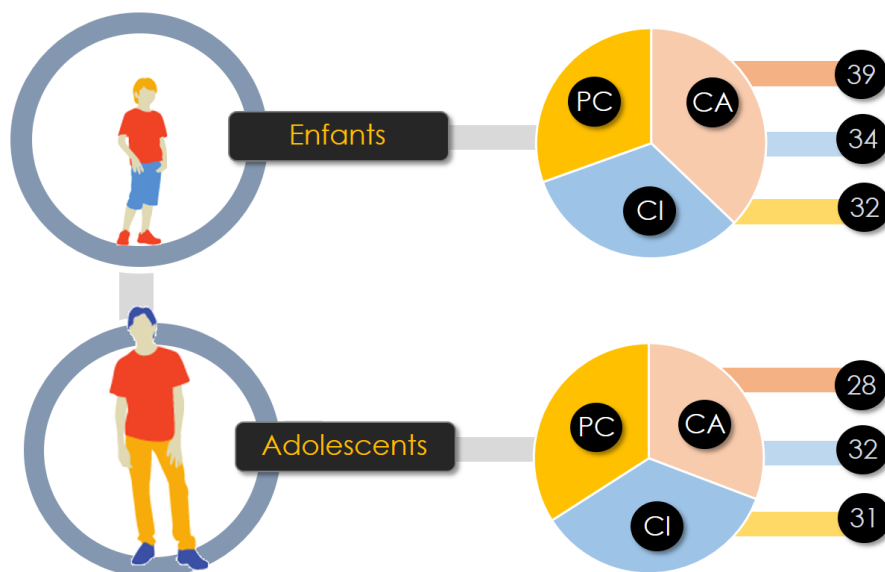
Les consentements devaient être signés par les titulaires de l'autorité parentale, une seule signature n'étant pas suffisante sauf cas particulier, i.e. un tuteur légal unique. Un exemplaire de chaque document a été conservé sous clé au sein du laboratoire (APEX Enfant) ou dans le Centre de Recherche Clinique, abrégé CRC, au Centre Hospitalier Sainte-Anne - GHU Paris psychiatrie & neurosciences (APEX Ado 1-2). Le deuxième exemplaire a été restitué aux parents/tuteurs. Bien que le consentement légal du mineur corresponde à celui de ses responsables, les enfants et les adolescents disposaient d'un espace pour exprimer leur propre assentiment afin de garantir leur souhait d'adhésion au projet, ainsi que leur motivation. De ce fait, les enfants ont été invités à entourer un smiley indiquant « je souhaite participer » ou « je ne souhaite pas participer » sur le livret d'information ; les adolescents ont reçu la consigne de signer les consentements dans le champ dédié pour cela.

Les critères d'exclusion de l'étude ont inclus des contre-indications à un examen IRM dans le cadre expérimental (e.g. présence de métal dans le corps, des bagues dentaires, claustrophobie, entre autres). Nous y ajoutons l'abus ou la dépendance à des substances, sauf nicotine, pendant plus de cinq ans ou ayant entraîné des comas ; une prise constante de médicaments susceptibles d'interférer avec les mesures d'imagerie cérébrale, tels que les psychotropes, hypnotiques, anxiolytiques, neuroleptiques, benzodiazépines, anti-inflammatoires, stéroïdes, antiépileptiques, antihistaminiques, antalgiques centraux et myorelaxants. De même, certains antécédents étaient prohibitifs en raison de leur effet potentiel sur le fonctionnement et l'anatomie du cerveau, comme des antécédents de traumatisme crânien ; une affection neurologique ou psychiatrique (e.g. diagnostic précédent d'autisme, schizophrénie, TDAH...) ; des antécédents de maladie majeure (e.g. diabète, maladie pulmonaire chronique, désordre cardiaque, métabolique, hématologique ou immunologique sévère). Des anomalies de la vision, comme le daltonisme et astigmatisme, ont également intégré les critères d'exclusion pour ne pas compromettre la performance aux tâches. La myopie, en revanche, a pu être compensée par des lunettes adaptées aux acquisitions en IRM. La liste des critères d'inclusion et exclusion figure en Annexes 1.

## 4.2. Design expérimental

L'étude APEX constitue un Essai Randomisé Aléatoire en simple insu. Cent cinq enfants sains ont été distribués aléatoirement dans trois situations d'entraînement, i.e. le groupe bénéficiant d'un entraînement au CI ; un groupe suivant un entraînement exécutif via la méditation de pleine conscience (PC), ou bien le groupe de contrôle actif (CA) avec un entraînement basé sur des questions de culture générale. Soixante adolescents typiques intégrant la branche APEX Ado ont été assignés aléatoirement soit au groupe CI, soit au groupe CA. Trente et un adolescents de la branche APEX Ado 2 ont constitué le groupe PC. Une illustration de cette répartition est présentée sur la Figure 14.

Une répartition équilibrée des sexes pour chaque branche d'APEX a été respectée du mieux que possible afin de pallier les possibles biais de genre (Ardila et al., 2011) – voir Table 1. Chaque participant a reçu un code d'anonymisation, contenant les initiales de son nom et prénom, ainsi que l'ordre d'inclusion dans la branche référente d'APEX.



**Figure 14.** Répartition des groupes d'entraînement dans APEX, les chiffres correspondent au nombre de participants par groupe et par tranche d'âge.

**Table 1.** Données descriptives APEX*(<sup>a</sup>) Adolescent Age PC vs CA ; (<sup>b</sup>) Adolescent Age PC vs CI*

	Groupe PC		Groupe CI		Groupe CA		Statistiques ( <i>p</i> -value)
	Enf	Ado	Enf	Ado	Enf	Ado	
<b>Total N</b>	32	31	34	32	39	28	
<b>Age(Moy ± Ety)</b>	9.28 ± 0.46	16.65 ± 0.49	9.39 ± 0.49	16.31 ± 0.47	9.46 ± 0.51	16.11 ± 0.32	<i>p</i> <0.001 <sup>a</sup> ; <i>p</i> =0.01 <sup>b</sup>
<b>Garçon/Fille</b>	14/18	15/16	15/19	11/21	16/23	10/18	

#### 4.2.1. Visite d'inclusion

Dans APEX Enfant, l'enfant était convié avec sa famille au centre Cyceron, Plateforme d'imagerie biomédicale normande au sein de l'enceinte du GANIL. Chaque passation correspondait à un créneau de réservation de quatre heures, comprenant la visite d'inclusion et les acquisitions en IRM. Un échange téléphonique deux jours avant le rendez-vous avait pour but de rappeler la consigne et éclairer certains points, tels que l'accès aux locaux et l'absence de prise médicamenteuse. Dès son arrivée, l'enfant était accueilli par l'ensemble de l'équipe, i.e. médecin, doctorantes, post-doctorante et manipulateur radio. Après les présentations, le mineur et son représentant légal étaient accompagnés par le médecin investigateur pour la visite d'inclusion. Les locaux étaient décorés sur des thèmes de l'univers afin de rendre la zone médicalisée moins austère pour les participants.

Dans APEX Ado, la visite d'inclusion pouvait être dissociée de la première acquisition en IRM car la présence des responsables légaux n'était obligatoire que lors de ce premier rendez-vous. Conformément au protocole chez l'enfant, l'adolescent était convié aux locaux du CRC, au sein du centre hospitalier Sainte-Anne, où il était reçu par l'équipe composée d'une doctorante et du médecin en charge des inclusions. Un mail envoyé deux jours avant avait pour but de rappeler la consigne et spécifier l'accès aux locaux. Deux contacts téléphoniques étaient mis à disposition en cas de questions tardives sur le projet. Contrairement à APEX Enfant, les locaux n'ont pas été décorés pour recevoir les lycéens.

Dans les deux branches d'APEX, la présence d'au moins l'un des responsables légaux était impérative lors de l'entretien d'inclusion. En cas de divorce, de voyage ou d'horaires incompatibles, une seule des parties pouvait comparaître à l'entretien, à condition que tous les consentements aient été dûment signés et paraphés par l'autre partie. Pour les familles monoparentales, la présentation du livret de famille était obligatoire.

Les candidats volontaires sains respectant l'ensemble des critères mentionnés précédemment ont été invités à un entretien médical pour l'inclusion dans l'étude. Lors de cet entretien, un médecin passait en revue les critères d'inclusion et d'exclusion, et s'assurait que le déroulement du projet avait été compris en détails par toutes les parties. Dans APEX Enfant, cet entretien durait approximativement une heure. Pour APEX Ado 1-2, l'entretien comptait 30 minutes. Cela aboutissait à l'entrée légale effective du participant dans l'étude, avec son inscription sur le registre des « Volontaires pour la Recherche Biomédicale ».

Afin d'illustrer cet entretien, nous décrivons ici son déroulement dans le cadre d'APEX Ado 2, la branche qui a été réalisée précisément dans le cadre de cette thèse. A l'exception des spécificités liées à l'adolescence, les visites d'inclusion dans APEX ont été organisées de manière similaire.

#### **4.2.2. Visite d'inclusion dans APEX Ado 2**

Une fois la date de la visite fixée, un mail contenant le récapitulatif des rendez-vous du projet, ainsi qu'un plan d'accès illustré indiquant les lieux de passation était envoyé au participant et/ou les titulaires de l'autorité parentale. À l'heure de la visite, un membre de l'équipe, e.g. la doctorante autrice de cette thèse, accueillait l'adolescent et les adultes au CRC où un médecin de l'équipe les prenait en charge. La vérification de la documentation requise était systématique, i.e. carte d'identité, carte vitale, carnet de santé du jeune.

Lors de ce rendez-vous, le médecin reprenait les modalités de la recherche, son objectif général et son cadre légal, telle que la description des contraintes et des risques prévisibles de l'essai. Il évaluait à nouveau les critères d'inclusion et de non inclusion dans le projet, tout en s'assurant que l'adolescent ne présentait pas de contre-indications à l'IRM, comme la présence de métal dans le corps, des signes de claustrophobie et une grossesse chez les

adolescentes. Le médecin vérifiait également les antécédents médicaux et les traitements médicamenteux en cours ; l'historique du développement pré et post natal selon l'échelle de Lewis-Murray des données obstétricales (OCS) qui évalue le déroulement de la grossesse et de l'accouchement (Owen et al., 1988) ; les informations du carnet de santé, comme la taille, le poids et le périmètre crânien à la naissance ; l'existence de pathologies psychiatriques chez les apparentés du premier degré ; la prise de toxiques divers, tels que nicotine, alcool et cannabis, et le taux de consommation le cas échéant.

A l'issue de cette visite, le volontaire était invité à remplir une échelle de développement pubertaire (Verlaan et al., 2001), étant donné que la puberté dépend notamment des facteurs neuroendocriniens et endocriniens qui ne se produisent pas au même moment pour tous les individus (Breehl & Caban, 2022). Un questionnaire portant à la fois sur les activités extrascolaires (e.g. sport, arts martiaux, activité artistiques), et sur l'utilisation des écrans (e.g. jeux vidéo, réseaux sociaux, télévision) était également proposé aux participants. De même, les parents répondaient à une évaluation des fonctions exécutives sur leur enfant (Gioia et al., 2000a) et remplissaient un questionnaire sur les données socio-économiques afin de fournir des éléments pour explorer la part de l'environnement sur la performance cognitive. Ces questionnaires seront détaillés par la suite.

### **4.2.3. L'entraînement cognitif**

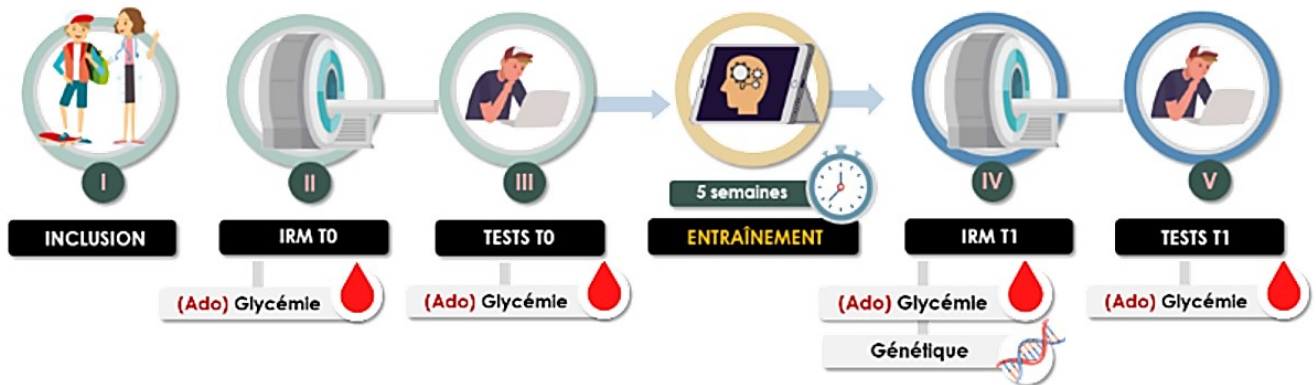
Au total, cent quatre-vingt-seize participants ont effectué l'entraînement intensif à domicile, sur tablette tactile, à raison de 25 sessions d'apprentissage de 15 minutes, une fois par jour, cinq jours par semaine, pendant cinq semaines. En accord avec la littérature, un entraînement cognitif intensif et régulier est le plus à même d'engendrer des modifications comportementales et cérébrales (e.g. Diamond & Ling, 2016). Ainsi, seules les participations comptant au moins 15 sessions d'apprentissage sur les cinq semaines ont été retenues dans l'analyse finale. Ce critère réaliste d'exécution a été vérifié par (1) le suivi hebdomadaire, (2) le nombre de sessions enregistrées sur la tablette, (3) le nombre de sessions signalées dans le journal de bord, qui devait être rempli après chaque séance par les parents/tuteurs (APEX Enfant) ou par les participants (APEX Ado 1-2).

Afin d'explorer les changements cérébraux, les participants ont effectué deux examens d'IRM : l'un en prétest, pour établir le niveau de départ (T0) ; l'autre en posttest, à la suite des cinq semaines d'entraînement (T1). De même, les participants ont réalisé une batterie cognitivo-comportementale contenant une vingtaine de tests sur différents domaines de la cognition (e.g. tâches classiques d'inhibition, d'attention, d'arithmétique, d'orthographe, entre autres) dans le but d'évaluer leur efficacité cognitive de base (T0) et post entraînement (T1). Le prélèvement salivaire pour les analyses génétiques des SNP a eu lieu lors du posttest après l'acquisition en IRM (Figure 15). Finalement, chez les adolescents uniquement, le taux de glucose sanguin a été obtenu à l'aide d'un glucomètre avant chaque examen IRM et chaque batterie cognitive. En fin de protocole, les enfants ont reçu comme gratification la tablette tactile et des cadeaux éducatifs, dont l'un incluant les images anatomiques de leur cerveau obtenues durant les acquisitions IRM du projet. De même, les adolescents ont reçu un chèque cadeau d'une valeur de 100 euros pour les remercier de leur participation à l'étude. Tous les volontaires ont été invités à ne pas diffuser les détails du projet auprès de leurs camarades. Il est important de souligner que les participants d'APEX Enfant et d'APEX Ado 1 ne connaissaient pas leur groupe d'attribution, une fois que celui-ci a été alloué aléatoirement.

Pour l'entraînement, nous avons employé des tablettes tactiles, un support numérique unique et d'usage facile. Les programmes d'entraînement ont été élaborés sur le logiciel E-prime 2.0 (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA). Le choix du support nous a permis de contrôler les différents paramètres d'affichage, tels que la police, la taille et le type d'écran, ainsi que l'exécution des tâches. En outre, cela nous a permis d'homogénéiser les variabilités interindividuelles de contexte familial et socio-économique concernant l'accès au numérique. Les tablettes ont été fournies après la batterie de tests cognitifs en pré-test.

Afin de maintenir et maximiser la motivation des participants, les entraînements ont reçu un visuel ludique, le plus proche possible des jeux disponibles dans le commerce. Des stimuli identiques ont été choisis pour toutes les conditions d'entraînement. De plus, au cours de chaque session, la difficulté de la tâche s'ajustait en fonction de la performance (voir Jaeggi et al., 2011), ce qui entretenait aussi la motivation. Il est également important de souligner que le contenu des exercices de CI et de méditation de pleine conscience était homogénéisé pour toutes les branches d'APEX par souci de comparaison.

Les participants et/ou leurs familles ont été contactés une à deux fois lors de la première semaine afin de s'assurer du bon déroulement des exercices et pour leur rappeler l'agenda d'entraînement. Un suivi régulier était également réalisé lors de semaines suivantes. Un des membres de l'équipe se tenait toujours disponible pour répondre à d'éventuels questions ou résoudre des problèmes techniques. Un débriefing a été prévu à la fin du projet, i.e. après la dernière batterie de tests cognitifs.



**Figure 15.** Schéma illustratif du protocole expérimental d'APEX.

#### 4.2.3.1. Méditation de Pleine Conscience (PC)

La pratique de la méditation dans APEX a été inspirée d'exercices classiques de pleine conscience adaptés au sujet jeune (e.g Kaiser Greenland, 2014; Snel, 2017). Huit exercices, chacun durant environ sept minutes, ont été implémentés sur tablette tactile sous forme d'enregistrement audio pour guider le participant de manière sonore. Deux exercices étaient sélectionnés aléatoirement pour chaque session. Contrairement aux autres groupes, la difficulté des tâches n'augmentait pas en tant que telle, mais chaque exercice évoquait différentes facettes de la pleine conscience, de plus simples au plus complexes.

Les exercices sélectionnés comprenaient :

1. Le yoga et la pleine conscience : cette pratique visait à renforcer la conscience sensorielle. Le participant devait s'allonger, étirer ses bras et ses jambes, tout en focalisant son attention sur le corps.
2. Le souffle : de manière contrôlée, rythmée et profonde, le participant devait employer sa respiration comme support pour l'attention.
3. L'écoute attentive cadencée : cet exercice concerne la conscience des sons ponctuels (comme le bruit des cloches) et l'état d'éveil.
4. Contemplation : la vue était employée comme support pour l'attention. Il se concentrait sur les aspects visuels de la scène proposée.
5. Le corps et la relaxation : le participant devait imaginer un animal touchant une partie de son corps ; selon la consigne, celle-ci se détend progressivement en réponse au toucher jusqu'à la relaxation totale.
6. Les 5 sens : le participant devait tester un aliment à partir de ses cinq sens : la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher ; il construisait donc une perspective holistique de la situation. Basé sur l'exercice du raisin (Histel-Barontini, 2021 ; Figure 16).
7. L'écoute attentive des sons en continu : le participant devait exercer sa concentration sur un son ininterrompu, comme le bruit de la pluie.
8. Méditation de compassion : cette pratique visait à renforcer la perception du monde environnant comme un tout, travaillant l'empathie, le respect et la tolérance avec autrui, ainsi que la gestion émotionnelle.



**Figure 16.** Exercice du raisin sec pour la pratique de méditation.



#### 4.2.3.2. Entraînement cognitif au contrôle inhibiteur (CI) <sup>1</sup>

Pour l'entraînement au CI, deux tâches paramétriques ont été adaptées sur tablette tactile par Grégory Simon et Julie Vidal. La difficulté des tâches s'ajustait en temps réel à la performance du participant, cette manipulation étant due à la variation de l'intervalle de temps entre l'amorce et la cible (variation du Stimulus Onset Asynchrony - SOA). Ces deux tâches étaient identiques pour les enfants et adolescents.

Premièrement, la tâche de Stop Signal (Lappin & Eriksen, 1966) a exercé l'inhibition motrice, comme nous l'avons indiqué précédemment (Verbruggen et al., 2008). En détails, le participant devait appuyer sur un bouton à gauche ou à droite selon la direction indiquée par les flèches à l'écran (essais dits « Go »), et ce le plus rapidement possible en veillant à ne pas faire d'erreur. Cependant, dans un deuxième temps, des essais « Stop » sont introduits sous la forme d'un bip, imposant la rétention ou la suspension de la réponse motrice (Figure 17).

Deuxièmement, une tâche de Stroop cognitif (Stroop, 1935) a fait appel au contrôle de l'interférence perceptive, i.e. l'inhibition cognitive (Caldas et al., 2012; Chen et al., 2011). Plus précisément, il s'agissait de dénommer la couleur du mot de couleur affiché à l'écran, la couleur étant similaire ou différente de celle indiquée par le mot. Par exemple, si le mot « bleu » était affiché en rouge (condition dite incongruente), la réponse correcte serait « rouge ». Ainsi, la tâche requérait l'inhibition d'une réponse devenue automatique (la lecture) afin d'activer une réponse moins automatique mais pertinente (la dénomination de la couleur, Figure 18).

---

<sup>1</sup> Afin d'éviter toute confusion avec le CI en tant que compétence exécutive, cet entraînement sera abrégé EC pour « entraînement cognitif » dans les études expérimentales.

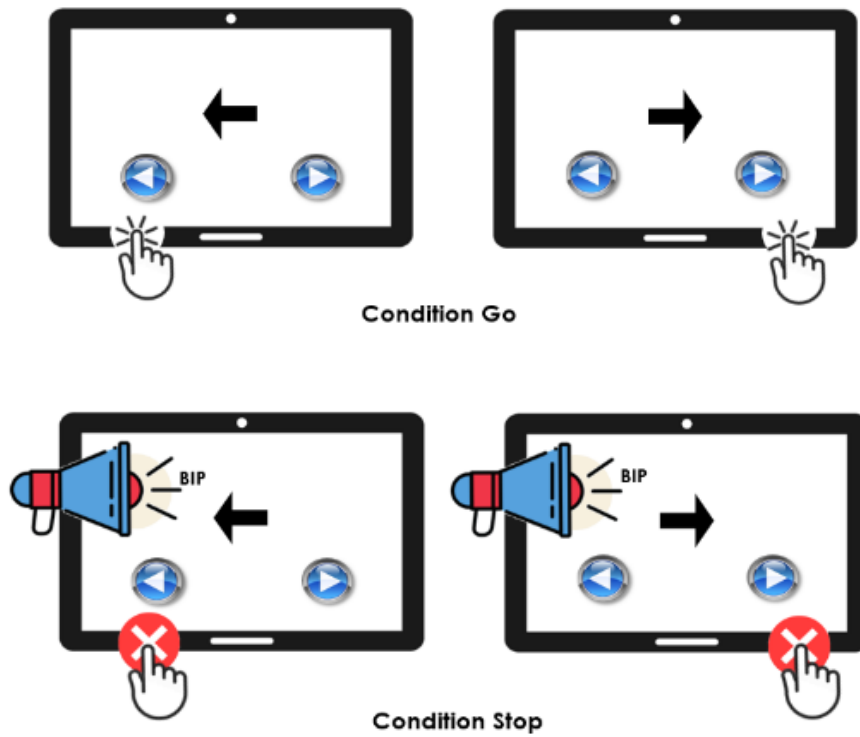


Figure 17. Tâche Stop Signal pour l'entraînement au CI.

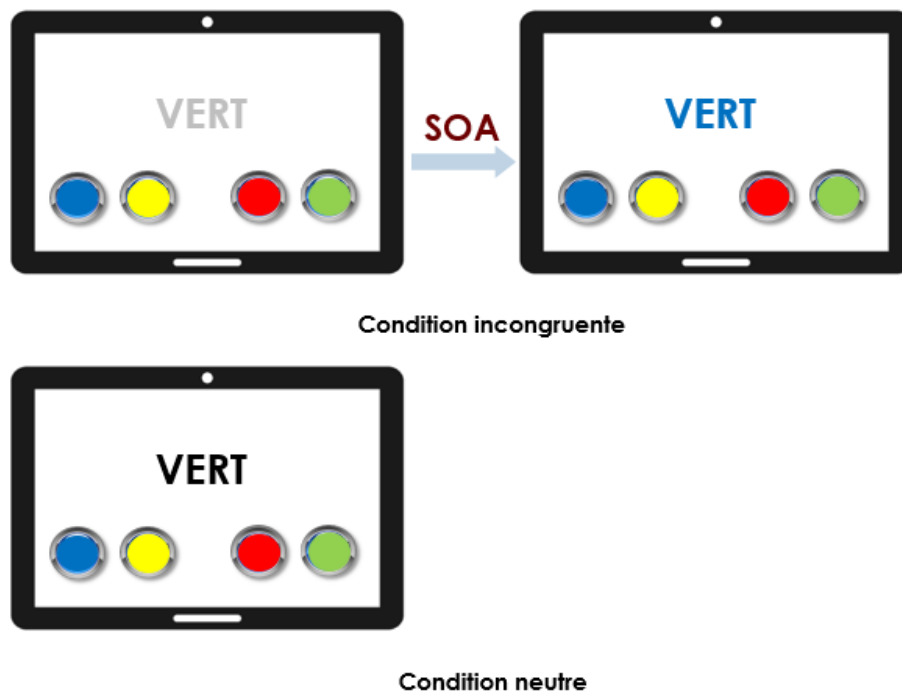


Figure 18. Tâche Stroop Cognitif pour l'entraînement au CI.

#### 4.2.3.3. Contrôle Actif (CA)

La condition de contrôle actif a été élaborée d'après la littérature (voir Klingberg, 2010), i.e. un entraînement de difficulté croissante, adapté au niveau du participant, sans exercice de l'inhibition. Inspiré de Jaeggi et al. (2011), l'exercice présentait des questions à choix multiples sur des connaissances générales, conçues selon la tranche d'âge.

Les enfants devaient répondre à des questions de vocabulaire et de culture générale, inspirées de la collection Les Incollables®, sélectionnées et étalonnées par Lisa Delalande, Marine Moyon et Katell Mevel. L'exercice comprenait deux jeux d'environ sept minutes, à savoir « Le Jeu des Questions générales » et « Le Jeu des Questions spécifiques », chaque bloc contenant 10 questions. Le premier couvrait des connaissances de culture générale (e.g. Quel type de ski se pratique sur l'eau : ski alpin/ski de fond/ski nautique/ski acrobatique) ; le dernier faisait appel à des aptitudes scolaires (e.g. Quel est le nombre de grammes dans 1/2 kg ?). Une seule réponse était correcte parmi les quatre options affichées. En cas d'échec, la bonne réponse apparaissait à l'écran et la question était à nouveau proposée dans ce niveau de performance. Néanmoins, en cas de réussite, aucun feedback n'était fourni. Les participants avaient un délai maximum de 30 secondes pour répondre. La difficulté des jeux s'ajustait sur huit niveaux. Précisément, (1) un nombre de bonnes réponses supérieur ou égal à 90% (i.e. une seule erreur maximum par bloc) permettait de valider le bloc et de passer au niveau suivant ; (2) un nombre de bonnes réponses inférieur à 70% sur un bloc reclassait la performance au niveau inférieur ; (3) pour les performances se situant entre les deux ( $\geq 70\%$  mais  $< 90\%$ ), le niveau restait inchangé. Ces paramètres ont créé une ambiance ludique susceptible de motiver les participants et ont permis un apprentissage actif sans solliciter directement les capacités inhibitrices.

Pour les adolescents, un premier recueil a rassemblé 1600 questions de culture générale. Par la suite, ces questions ont été pré-testées, triées et étalonnées en ligne à travers le logiciel Qualtrics (<https://www.qualtrics.com/fr/>) par Cloélia Tissier chez une centaine de lycéens, générant huit niveaux de difficulté. Des questions à choix multiples concernant leurs connaissances générales s'affichaient à l'écran avec quatre possibilités de réponse, dont une seule réponse correcte. Les critères de feedback et d'ajustement du niveau de difficulté étaient similaires aux paramètres du groupe CA chez les enfants (Figure 19).



**Figure 19.** Exemples de tâches d’entraînement au CA chez les enfants (fond blanc) et chez les adolescents (fond gris).

#### 4.2.4. Imagerie pré et post-entraînement

Les enfants ont été scannés dans la plateforme d’imagerie biomédicale Cyceron à Caen. Pour les adolescents, les données IRM ont été acquises dans le Centre d’Imagerie de Recherche et d’Enseignement des Neurosciences de l’Hôpital Sainte-Anne (CIREN), à Paris. Les paramètres des séquences d’acquisition entre l’IRM 3.0 Teslas à Cyceron (Achieva, Philips Medical System, Pays Bas) et l’IRM 3.0 Teslas au CIREN (General Electric Healthcare) ont été optimisés pour être les plus semblables afin de permettre les comparaisons inter sites.

Le protocole inclut des acquisitions en IRM (1) anatomique (IRMa) afin d’évaluer et comparer les caractéristiques morphologiques et morphométriques cérébrales en pré-test et posttest ; fonctionnelle (IRMf) dans le but d’examiner les variations régionales de l’amplitude du signal BOLD en tant que reflet de l’activité neuronale soit au repos (IRMrs, *resting state*), soit au cours de trois tâches classiques d’inhibition ; de diffusion (IRMd) pour explorer les variations des changements microstructuraux et de la connectivité des fibres de matière blanche liées aux entraînements proposés. Nous précisons par la suite le déroulement de la procédure sur chaque site, passant ensuite aux détails sur les acquisitions en l’IRM anatomique uniquement, celles-ci constituant l’objet de notre étude 3.

#### **4.2.4.1. Déroulement sur site**

Afin de répondre au mieux aux besoins de chaque tranche d'âge, les protocoles d'habituations aux passations en IRM et l'accommodation des volontaires ont été conçus différemment pour enfants et adolescents, comme nous allons le détailler par la suite.

##### *4.2.4.1.1. Chez l'enfant (Caen)*

La nécessité de rester immobile dans un environnement particulièrement bruyant peut constituer un obstacle important pour les acquisitions chez l'enfant. Ainsi, dans le but de rendre l'expérience la plus agréable possible pour ces jeunes participants, les enfants d'APEX ont bénéficié d'un stage de préparation et familiarisation à l'examen. Plus précisément, nous avons organisé un environnement ludique qui reproduisait les critères les plus laborieux des passations en IRM, tels que le confinement dans un espace étroit et bruyant et la nécessité de rester immobile.

Lorsque l'enfant était accueilli pour l'examen, le déroulement de la journée lui était détaillé afin d'amenuiser toute angoisse causée par l'inconnu. Premièrement, l'habituations au bruit de l'IRM a été réalisée par le biais d'une bande sonore préalablement enregistrée dans un dictaphone. Ensuite, le « jeu de la statue » invitait l'enfant à rester immobile tout en répondant à des questions qui communément suscitent des mouvements, telles que « de quelle couleur sont mes chaussures ? ». A la fin, le participant s'entraînait aux tâches prévues en IRMf, chacune durant deux minutes approximativement. La tâche Stop Signal et la tâche des matrices de points évaluant la MdT, nommée Dot task, ont été présentées sur ordinateur à l'aide du logiciel E-Prime 2.0. Cet entraînement commençait en position debout afin d'exercer l'immobilité et se répétait en position allongée, dans une fausse IRM (Delalande et al., 2020; Leroux et al., 2013). Celle-ci représentait d'un tunnel en tissu avec une petite ouverture où un mini-écran portatif a été posé afin de simuler la visualisation des stimuli en IRMf. Cet entraînement pouvait être renouvelé autant de fois que nécessaire, notamment si le taux de essais Stop réussis était inférieur à 40% à la tâche Stop Signal ou si le participant commettait des fautes constantes à la Dot task.

Après l'entraînement, l'enfant était invité à mettre le pyjama chirurgical, à usage unique, pour éviter l'introduction par mégarde de matériaux ferromagnétiques, potentiellement dangereux, dans la salle d'IRM. Si le participant portait une correction visuelle, des lunettes compatibles à l'IRM, i.e. sans composante ferromagnétique, à verres ajustables (entre -6 et +6 dioptries), lui étaient proposées.

Une visite de la salle avant l'acquisition en IRM permettait au jeune participant de se sentir plus assuré. Cette salle était totalement décorée sur le thème de voyage dans l'espace afin d'atténuer le caractère anxiogène de la passation. L'enfant était donc installé sur le lit de la machine, la climatisation étant ajustée afin de garantir son confort. Chaque individu a eu le choix d'avoir une couverture, de poser un coussin sous les jambes pour éviter une éventuelle pression lombaire et d'ajouter des bouchons d'oreille au casque audiophonique amagnétique à transmission pneumatique, si le bruit de l'IRM était mal toléré. Malgré la protection auditive, l'équipe était à même de communiquer clairement avec l'enfant pour annoncer les consignes des tâches et s'assurer du déroulement des séances. L'équipe vérifiait également si le participant entendait le bruit des stimuli, i.e. les bips dans la tâche Stop Signal. De plus, une poire d'appel d'urgence, attachée au pyjama, permettait que tout problème éventuel soit averti à l'équipe. Conformément à la consigne donnée à l'enfant, le déclenchement de cette poire engendrait l'arrêt de l'examen en cours et l'arrivée imminente de l'équipe.

Un miroir amovible était positionné sur l'antenne, à proximité des yeux du participant. Par une rétroprojection, le miroir permettait de voir l'écran localisé derrière l'aimant, où les stimuli des tâches en IRMf s'affichaient. En outre, avant l'entrée du lit dans le tunnel, la tête de l'enfant était entourée par des cales en mousse afin de limiter ses mouvements (Figure 20). S'il exprimait la peur de rester seul, un parent pouvait lui tenir la main dans la salle IRM en suivant les critères de protection expliqués précédemment, comme la suppression de tout objet métallique et le port du pyjama chirurgical. Les doudous non métalliques étaient également acceptés.



(a)



(b)



(c)

**Figure 20.** (a) Installation de l'enfant sur le lit IRM décoré ; (b) L'enfant indique qu'il est prêt à entrer dans l'aimant ; (c) L'enfant équipé du boîtier réponse.

Les acquisitions ont été réalisées sur l'IRM corps entier à haut champ magnétique Achieva 3,0 Teslas quasar dual (Philips Healthcare, The Netherlands) de la plateforme d'imagerie du GIP Cyceron à Caen. Pour ce jeune public, le temps d'examen a été réduit au maximum 45 minutes avec une pause. Aucune prémédication ni injection de produit de contraste n'ont été réalisées. Durant le recueil de données anatomiques, les enfants ont pu assister à un dessin animé de leur choix parmi trois (Greene et al., 2018), projeté sur le miroir selon le dispositif décrit ci-dessus. Précisément, le dessin animé permettait non seulement d'augmenter l'agrément de la séance, mais également de limiter les mouvements de tête de par la concentration qu'il suscite (Greene et al., 2018; Vanderwal et al., 2018). Les paramètres d'exposition ont respecté un seuil optimal : contraste 15 ; luminosité 15 et netteté 10. En outre, la boîte d'acquisition d'images a été positionnée parallèlement à l'axe de la commissure-antérieure/commissure-postérieure afin de conserver les repères neuroanatomiques standards et optimiser l'analyse postérieure des images obtenues. Le contact vocal et visuel avec le participant a été maintenu tout au long des acquisitions.

Chez les enfants, la première partie de l'IRM comprenait quatre séquences :

1. Un calibrage incluant un repérage dans les trois plans de 57 sec et un RefScan de 44 sec pendant lequel l'enfant regardait le dessin animé de son choix ;
2. L'acquisition anatomique 3D écho de gradient pondérée en T1 millimétrique de 9 min 24, durant laquelle l'enfant visionnait le dessin animé ;
3. Une séquence anatomique 2D écho de gradient pondérée en T2\* de 4 min 05, durant laquelle l'enfant visionnait le dessin animé ;
4. Une séquence fonctionnelle de repos (*resting state*) de 8 min. Le but de cet essai étant d'explorer les variations régionales du signal BOLD au cours d'un état conscient de repos, le dessin animé n'était plus disponible. La consigne indiquait à l'enfant de fermer les yeux et, surtout, ne pas s'endormir, laissant libre cours à ses pensées. Si l'enfant ouvrait éventuellement les yeux, il visualisait un écran noir uni.

Une pause de 15 minutes était prévue dans la procédure d'acquisition chez les enfants. Cela s'avérait essentiel pour maintenir la motivation et l'éveil du participant. Pendant ce temps, l'enfant était invité à découvrir les images anatomiques de son cerveau, pondérées en T1, sur les coupes coronales, transverses et sagittales. Chaque image ayant été vérifiée en



amont par le médecin investigateur afin d'écartier tout événement indésirable, cet échange sur le cerveau motivait l'enfant à poser des questions et à écouter attentivement les explications du médecin sur les principaux repères anatomiques – e.g., le corps calleux, le tronc cérébral, les lobes cérébraux.

Par la suite, un passage impératif aux toilettes avait pour but d'assurer le bon déroulement de la seconde partie des acquisitions. L'installation de l'enfant suivait les étapes décrites précédemment. Un boîtier pour les réponses aux tâches en IRMf, testé préalablement, était positionné sous la main droite du participant, selon son aise. Afin de distinguer l'index et le majeur posés sur les boutons réponse, une pastille granuleuse avait été collée sur le bouton plus à gauche, alors que celui de droite avait une texture lisse.

La seconde partie de la procédure IRM comprenait également quatre séquences, après un calibrage incluant un repérage dans les trois plans, identique au premier, durant lequel l'enfant regardait le dessin animé de son choix.

1. Une séquence anatomique 2D écho de gradient pondérée en T2\* de 4 min 05, durant laquelle l'enfant visionnait le dessin animé ;
2. Une séquence fonctionnelle d'activation 2D écho de gradient en T2\* de 2 fois 10 min maximum, comprenant les tâches Stop Signal et la Dot task.
3. Une séquence fonctionnelle d'imagerie de diffusion à haute résolution angulaire de 10 min, durant laquelle l'enfant visionnait le dessin animé.
4. Une séquence 2D multi-écho de gradient afin d'obtenir la carte d'homogénéité du champ T0 durant 1min45.

#### *4.2.4.1.2. Chez l'adolescent (Paris)*

L'adolescent étant plus âgé que l'enfant, aucun stage d'habituatation à l'IRM n'a été prévu pour ce public. Ainsi, la consigne pour garder une posture immobile et l'avertissement concernant l'intensité du bruit ont été annoncés et répétés de manière claire et précise.

Le participant était convié 30 minutes avant les acquisitions pour s'exercer aux tests prévus en IRMf. Conformément à la procédure chez les enfants, les tâches Stop Signal et Dot task ont été affichées sur un ordinateur à l'aide du logiciel E-prime 2.0. De plus, la tâche de gratification retardée (DDT) et l'ANT ont été élaborées sur le logiciel Matlab R2015b (<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>), avec l'extension Psychophysics Toolbox version 3 (Brainard, 1997). Les participants pouvaient s'entraîner autant de fois que le nécessaire pour assurer la bonne compréhension des consignes. À cette fin, des points de repère ont été établis : le DDT ne comportait pas de bonnes ou de mauvaises réponses, le retour verbal du sujet devait donc confirmer sa compréhension ; la Dot task et l'ANT étant considérées comme faciles, des erreurs constantes reflétaient des difficultés ; pour la tâche Stop Signal, le sujet était censé réussir un signal Stop sur deux, i.e. une réussite totale variant entre 40 et 60% des essais Stops pour une durée de signal Stop de 200 ms. L'ordre d'exécution des tâches pendant l'entraînement ne correspondait pas forcément à l'ordre prévu en IRMf, celui-ci étant randomisé.

Avant que le participant ne rejoigne la salle d'acquisition, les critères de compatibilité avec l'IRM étaient vérifiés à nouveau par une personne de l'équipe APEX, e.g. l'absence de métal sur le corps. Les pyjamas n'étaient prévus pour cet échantillon. Une fois dans l'enceinte IRM, des bouchons d'oreille et un casque audiophonique amagnétique étaient fournis au participant afin de permettre la communication avec l'équipe et le suivi des stimuli, tout en atténuant le bruit émis par l'aimant. En cas de correction visuelle hors lentilles, des lunettes adaptées, assurées IRM, étaient proposées. La poire d'appel était alors fixée au corps de l'adolescent. Nous avons mis l'accent sur son utilité en cas de détresse ou problème technique. Allongé et immobile sur le lit, le sujet était couvert, calé par des mousses, et un coussin positionné sous les genoux pour éviter des douleurs lombaires éventuelles, causées par la durée prolongée de la séance (exemple en Figure 21). L'ajustement du miroir qui permettait la visualisation de l'écran à l'arrière de l'aimant était effectué par le lycéen lui-même sous notre consigne afin de garantir un retour visuel optimal. Un boîtier réponse pour l'IRMf était disposé au niveau de la cuisse droite du participant, sa main posée dessus. Pour les séquences ne requérant pas de consigne particulière, i.e. IRMa et IRMd, nous avons diffusé la musique du choix de l'adolescent, préalablement notée. La procédure totale d'acquisition durait environ 1 heure 20 minutes, sans pause.

Pour l'étude sur la pleine conscience chez les adolescents, l'auteure de cette thèse a été la responsable pour réaliser l'entraînement aux tâches en IRMf, la vérification des critères de compatibilité IRM, les explications concernant les séquences d'acquisition, l'accommodation du sujet dans la salle IRM avec la manipulatrice en charge d'APEX Ado 2, Anna Fayolle, ainsi que le scan lui-même et les instructions en IRMf, et ce, sur plus de la moitié des participants. A l'exception du scan IRM et des consignes en IRMf, ces occupations pouvaient être partagées avec d'autres membres de l'équipe APEX.

Les séquences IRM chez l'adolescent ont été paramétrées par Stéphanie Lion, manipulatrice en charge d'APEX Ado, associée à l'époque à l'Université Paris Descartes (maintenant Université Paris Cité), plateforme d'imagerie du Centre Hospitalier Sainte-Anne, selon le protocole suivant :

1. Un calibrage incluant un repérage dans les trois plans de 57 sec et un RefScan de 44 sec pendant lequel l'adolescent écoutait la musique de son choix ;
2. L'acquisition anatomique 3D écho de gradient pondérée en T1 millimétrique de 9 min 45, durant laquelle l'adolescent écoutait la musique de son choix ;
3. Une séquence fonctionnelle de repos (*resting state*) de 6 min 4. La musique était arrêtée, l'écran s'affichait noir. La consigne précisait au participant de fermer les yeux et ne pas s'endormir, tout en laissant libre cours à ses pensées.
4. Une séquence fonctionnelle d'activation 2D écho de gradient en T2\* de quatre fois 10 min maximum, incluant les tâches Stop Signal, Dot task, DDT et ANT. L'ordre des tâches était randomisé inter-sujets mais était maintenu constant en intra-sujet, entre le pré- et le posttest. Les consignes étaient systématiquement rappelées au début des tâches.
5. Une séquence anatomique 2D écho de gradient pondérée en T2\* de 6 min, durant laquelle l'adolescent écoutait de la musique ;
6. Une séquence d'imagerie de diffusion avec la direction de la phase inversée, nécessaire pour les corrections de distorsion pendant 6 minutes, la musique étant toujours présente.
7. Une séquence de diffusion avec 32 directions pendant 2 minutes, durant laquelle le participant écoutait de la musique.

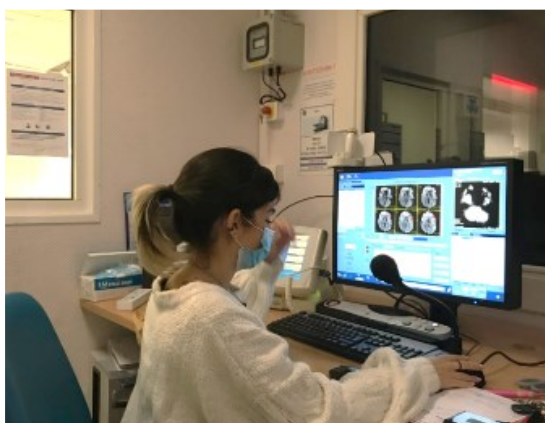
A défaut de ne pas avoir une pause pour échanger sur leur ressenti, un court débriefing était réalisé avec les adolescents à leur sortie de l'enceinte IRM. A ce moment, il était souvent possible de leur montrer les images anatomiques récoltées, celles-ci ayant été préalablement examinées par le médecin investigateur.



(a)



(b)



(c)

**Figure 21.** (a) Installation du participant par la manipulatrice IRM ; (b) L'adolescent est prêt à entrer dans l'aimant ; (c) L'acquisition de données.

#### **4.2.4.2. Paramètres d'acquisitions en IRM Anatomique**

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur les données anatomiques du protocole APEX. Chez les enfants, cette séquence 3D écho de gradient pondérée en T1 était de 9 min 24 a été obtenue à l'aide des paramètres suivants : TR 7.2 ms ; temps d'écho 3.3 ms ; angle de bascule 9° ; orientation sagittale ; résolution spatiale 1mm isométrique ; matrice d'acquisition 256 x 256 x 176. Chez les adolescents, cette séquence 3D écho de gradient pondérée en T1 de 9 min 45 était acquise avec les paramètres suivants : temps de répétition 8,18 ms ; temps d'écho 3,19 ms ; angle de bascule de 11° ; matrice d'acquisition 256 x 256 x 176 ; orientation sagittale ; taille des voxels 1 mm isométrique. Nous soulignons que les paramètres des séquences d'acquisition entre les deux sites ont été optimisés pour donner les images les plus similaires possible.

#### **4.2.5. Evaluations cognitives pré et post-entraînement**

Dans le but d'évaluer l'effet de l'entraînement, chaque participant a effectué individuellement, avant et après l'intervention, une batterie de tests cognitifs couvrant des tâches classiques du CI (i.e. transfert proche) et des tâches complémentaires dans plusieurs domaines (i.e. transfert lointain), telles que la lecture (Ahr et al., 2017; Ahr et al., 2016; Borst et al., 2015) et le raisonnement (Bago et al., 2019; Boissin et al., 2021; De Neys & Pennycook, 2019; Houdé, 2014b). Les batteries cognitives étaient légèrement différentes entre enfants et adolescents, certaines tâches étant spécifiques à une seule tranche d'âge comme la tâche de l'Alouette (Lefavrais, 1967), évaluée uniquement chez les enfants. Pour l'illustrer, la liste de tâches effectuées par les adolescents figure en Annexes 2.

Les tests informatisés ont été présentés sur des ordinateurs portables HP avec une résolution d'écran de 1366\*768 pixels, (310\*170 mm<sup>2</sup>), un taux de rafraîchissement de 60 Hz et un clavier AZERTY. Toutes les tâches ont été conçues avec le logiciel E-Prime 2.0. Nous avons privilégié des interfaces ludiques et des consignes employant le terme « jeu » pour augmenter l'agrément de la passation et stimuler la motivation des participants, notamment chez les plus jeunes. De plus, trois tests papier-crayon ont été également proposés.

Nous nous intéressons particulièrement au Stroop Cognitif, Stroop Emotionnel, ANT et Stop Signal, réalisés par les enfants et adolescents afin de mesurer les capacités d'inhibition. Une phase d'entraînement précédait chaque partie expérimentale afin d'assurer la compréhension préalable des règles. Par ailleurs, les participants ont reçu la consigne de fournir leurs réponses le plus rapidement possible, tout en essayant de maintenir une bonne précision.

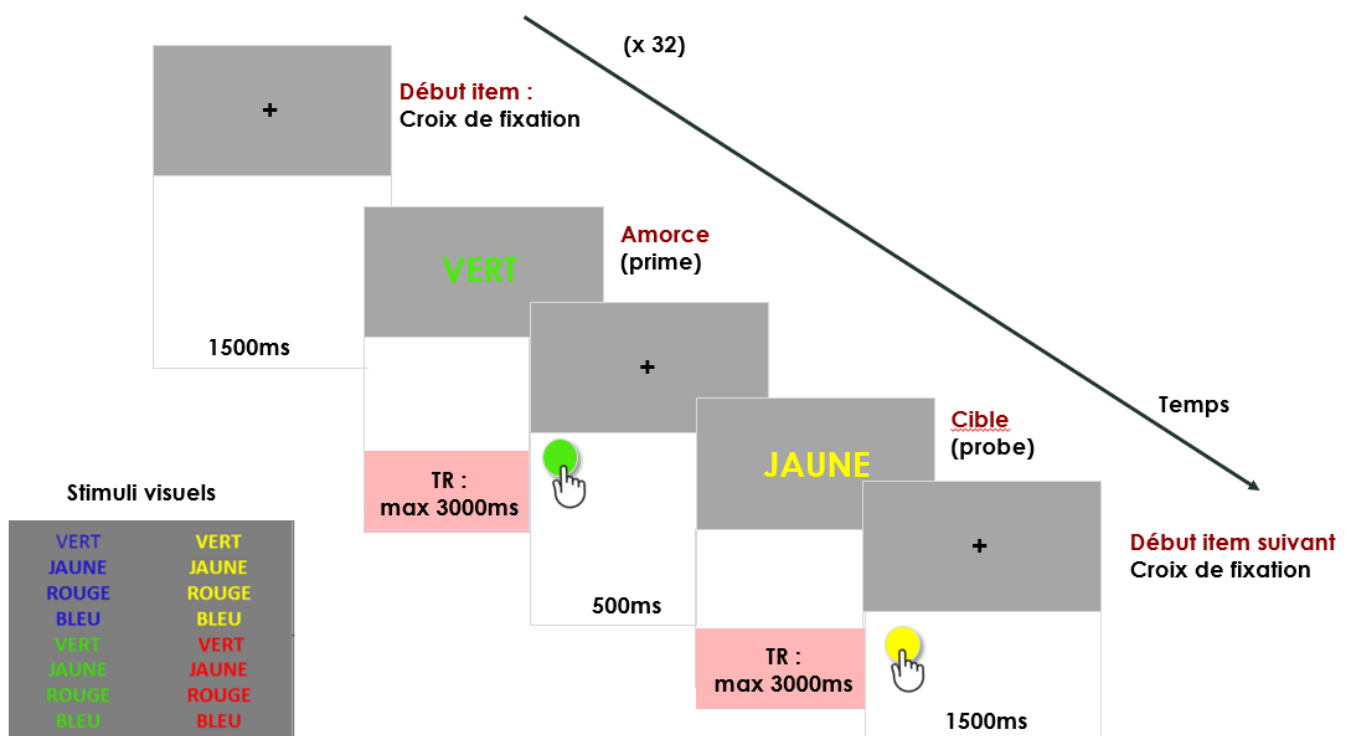
#### **4.2.5.1. Stroop Cognitif**

Le Stroop Cognitif (Stroop, 1935), aussi appelé Stroop couleur ou encore Stroop froid, constitue une tâche classique de psychologie expérimentale qui vise à évaluer les capacités d'inhibition de l'interférence. Dans cette tâche, les stimuli désignant des couleurs (jaune, bleu, vert ou rouge) sont écrits dans une encre de couleur (jaune, bleue, verte ou rouge). Ainsi, la couleur indiquée par le mot peut soit correspondre à celle dans laquelle il est écrit (condition congruente), soit non (condition incongruente). Le participant doit être capable de bloquer un processus automatisé, i.e. la lecture du mot, afin d'activer activant un processus reconnu comme inhabituel, i.e. la dénomination de l'encre. Le score d'interférence (le temps de réponse moyen aux items incongruents moins le temps de réponse moyen aux items congruents) reflète le coût cognitif associé à l'inhibition de l'interférence.

Dans APEX, la tâche de Stroop couleur présente 32 paires de stimuli, comptant un total de 64 items. Une croix de fixation s'affiche à l'écran pendant 1500ms entre les paires de stimuli et pendant 500ms au sein de chaque paire. Chaque item reste affiché durant 3000ms, correspondant au délai de réponse du participant. Les mots de couleur sont écrits en gras Courier New de 24 pt et présentés sur un fond gris. Les couleurs disponibles, rouge, bleu, vert et jaune (codes de couleur RVB 255;0;0, 0;0;255, 0;255;0, 0;0;255, et 255;255;0, respectivement) sont rappelées sur deux boutons-réponse. Ainsi, la touche « S » représente le jaune et le bleu ; la touche « L », le rouge et le vert. Chaque bouton est étiqueté avec un autocollant de la couleur correspondante.

Il existe alors trois types d'items : les items congruents, lorsque le nom et la couleur du mot coïncident, e.g. « bleu » écrit en bleu ; les items incongruents dont une réponse erronée

renvoie au mauvais bouton-réponse, e.g. « bleu » écrit en rouge, le participant appuie sur la touche « S » (bleu et jaune) au lieu de « L » (rouge et vert) ; les items incongruents dont la réponse erronée et la bonne réponse se trouvent sur le même bouton, e.g. appuyer sur la touche « S » pour le mot « bleu » écrit en jaune. Dans un premier temps, le participant s'entraîne à distinguer la couleur des pastilles montrées à l'écran. Cela nous permet de stimuler la maîtrise des boutons-réponse et vérifier l'existence des difficultés à percevoir les couleurs. Douze essais constituent cette partie. Ensuite, l'individu s'entraîne à réaliser le vrai jeu en ayant la consigne de répondre le plus vite possible et sans se tromper. Huit essais composent cette partie, un feedback étant affiché après chaque réponse. Par la suite, la partie expérimentale compte 32 essais sous la même consigne, sans feedback (Figure 22).



**Figure 22.** Tâche de Stroop Cognitif.

#### 4.2.5.2. Stroop Emotionnel

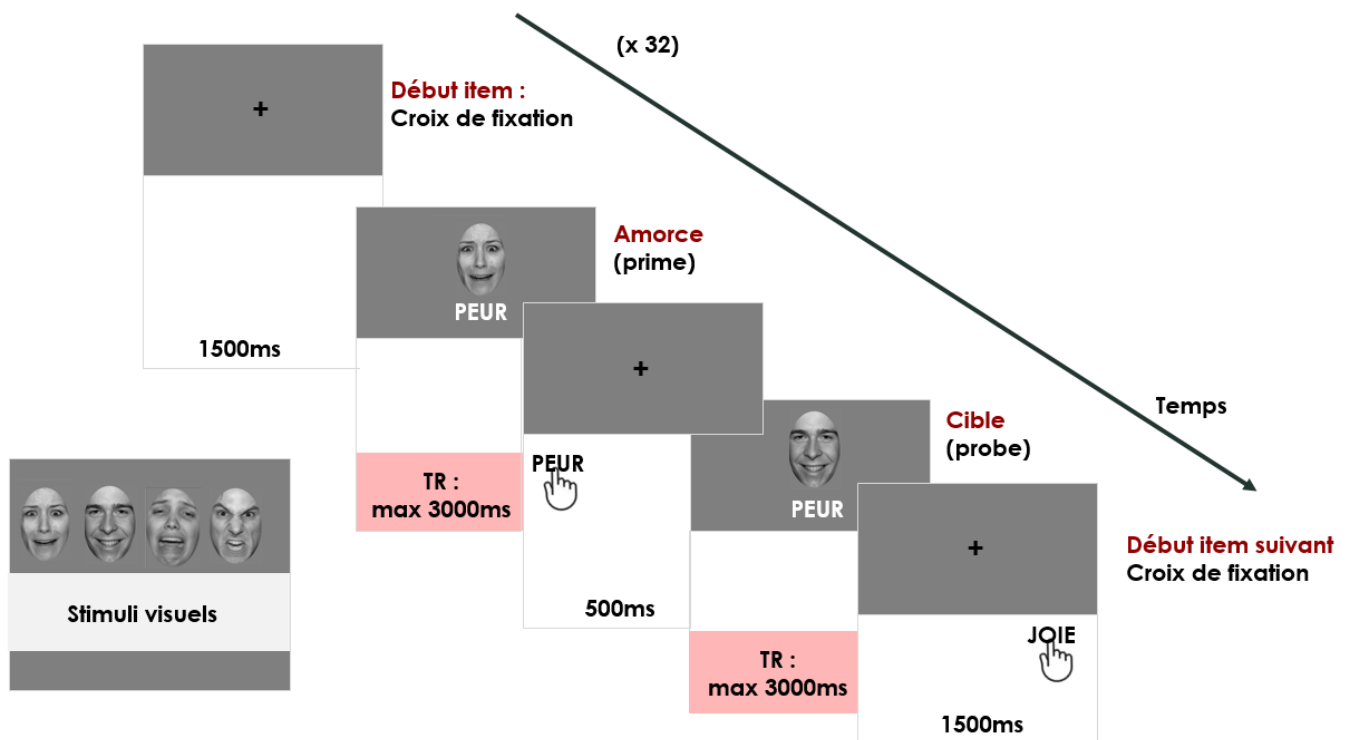
Nommé également « Stroop chaud », cette version du Stroop vise à évaluer les capacités de CI chaud (Aïte et al., 2018; Bouhours et al., 2021b). Plus précisément, cette tâche présente des visages exprimant des émotions. En effet, les expressions faciales émotionnelles déclenchent différents processus physiologiques et psychologiques qui nous permettent d'en extraire les éléments les plus saillants et leur attribuer une signification (Kret et al., 2013; Lundqvist & Ohman, 2005). Bien qu'il existe un débat sur les différences concernant les effets engendrés par des visages virtuels et réels (Philip et al., 2018), notre perception ne demeure pas indifférente vis-à-vis de ces stimuli (Bradley et al., 2008; Philip et al., 2018).

Dans APEX, cette tâche comprend quatre photographies de visages coupés en format ovale, dépourvus de cheveux, en noir et blanc, issus de la base de données NimStim (Tottenham et al., 2009). Ils expriment quatre émotions différentes, i.e. la joie, la colère, la tristesse et la peur, de deux hommes et deux femmes. Les visages sont associés à quatre mots qui apparaissent en dessous de l'image, écrits en 32 pt Courier New en français, indiquant des émotions en lettres capitales, i.e. « JOIE », « COLERE », « TRISTESSE » et « PEUR ». Le participant doit inhiber la lecture du mot et dénommer l'émotion exprimée par le visage.

Les autres paramètres de la tâche sont équivalents à ceux du Stroop cognitif. Les émotions sont attribuées à deux touches-réponse sur le clavier. La touche « D » désigne la joie et la tristesse ; la touche « K », la peur et la colère. Chacune possède l'étiquette de l'émotion correspondante. Trois types d'items composent la tâche : les items congruents, lorsque le nom et l'émotion affichée coïncident, e.g. un visage craintif associé au mot « PEUR » ; les items incongruents dont une fausse réponse renvoie à presser le mauvais bouton, e.g. « joie » associé au mot « colère », le participant appuie sur la touche « K » (peur et colère) au lieu de « D » (joie et tristesse) ; les items incongruents dont la réponse erronée et la bonne réponse se trouvent sur la même touche, e.g. un visage de joie accompagné du mot « tristesse », les deux sur la touche « D ». Au total, cette tâche contient quatre items congruents et 12 items incongruents, le tout comptant huit types de paires d'items sur 32 essais.

Dans un premier temps, le participant s'entraîne pendant 12 essais à distinguer les émotions, sans mot associé. Cela nous permet de l'habituer aux stimuli. Ensuite, l'entraînement reproduit les conditions de la vraie tâche sur huit essais, en y associant un feedback. La partie expérimentale a lieu après, comptant 32 essais sans feedback (Figure 23).





**Figure 23.** Tâche de Stroop Emotionnel.

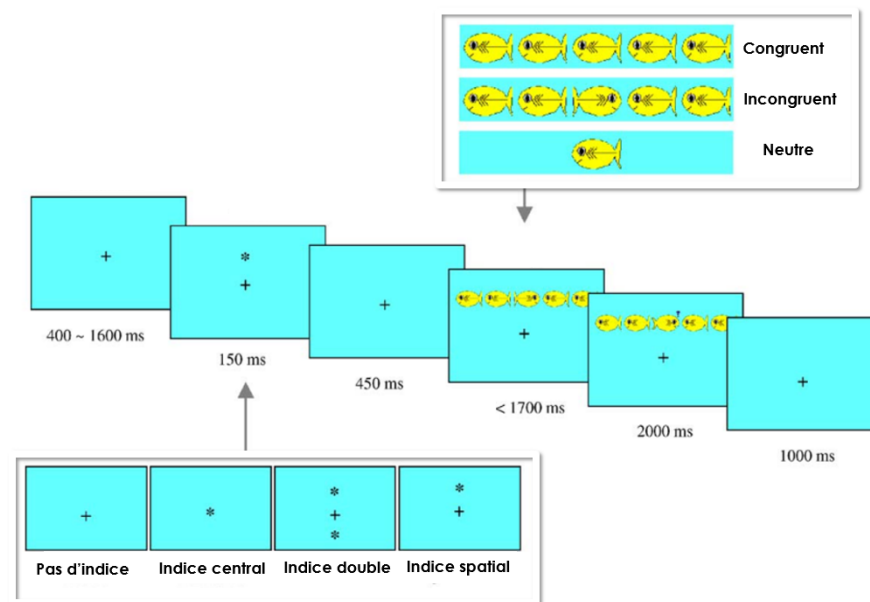
#### 4.2.5.3. Attention Network Task

Précédemment évoquée dans cette thèse, l'ANT (Fan et al., 2002) permet d'évaluer l'état d'alerte, l'orientation spatiale et le contrôle exécutif, celui-ci faisant appel au CI (Barkley, 1997; Diamond, 2013; Grinspun et al., 2020; Houghton et al., 1996). Cette tâche peut être facilement réalisée par les enfants et adolescents (Fan et al., 2002). Dans sa version originale, l'ANT dure 30 minutes (Fan et al., 2002; Rueda et al., 2004), mais cette durée a été raccourcie à environ 10 minutes afin de composer la batterie d'APEX.

Dans APEX, nous avons utilisé la version de l'ANT pour enfants, développée par Rueda et al. (2004). Les stimuli consistent en une rangée de cinq poissons jaunes disposés horizontalement sur un fond bleu turquoise. La cible est un poisson pointant vers la gauche

ou la droite, situé au centre de la rangée. Cette cible est entourée de part et d'autre par deux poissons – les flankers – indiquant soit la même direction (condition congruente), soit la direction opposée (condition incongruente), ou des lignes sans poisson (condition neutre). Les participants doivent appuyer sur le bouton réponse correspondant à la direction indiquée par la cible, i.e. bouton gauche si la cible pointait vers la gauche, et bouton droit, pour la droite. Dans certains essais, des indices pour fixer l'attention du participant apparaissent au centre (y=384), au-dessus (y=414) ou en dessous (y=354) de la rangée centrale.

Dans une adaptation de Rueda et al. (2004), chaque essai d'APEX commençait par une période de fixation de 400 ms, puis, dans certains essais, un indice d'avertissement était affiché pendant 150 ms. Une période de fixation de 400 ms suivait la disparition de l'indice, succédée soit par l'apparition simultanée de la cible et des poissons flankers, soit par la cible seule. Cette image restait à l'écran jusqu'à la réponse du participant, pour une durée maximale de 1700 ms. Au total, l'ANT dans APEX présentait 20 essais, résultant d'une combinaison équilibrée de la présence ou l'absence de l'indice d'avertissement, les différentes positions de celui-ci (centre, haut ou bas) ; et la congruence et l'incongruence des flankers (Figure 24).

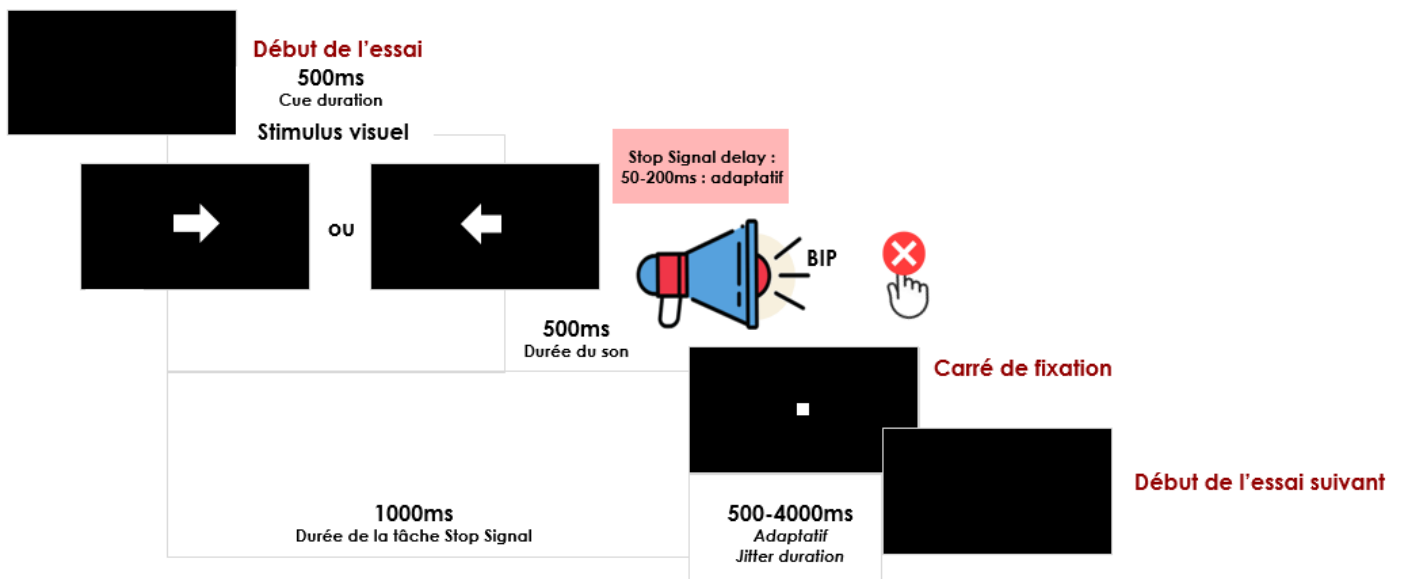


**Figure 24.** Schéma de l'ANT, inspiré de Rueda et al. (2004).

#### 4.2.5.4. Stop Signal

La tâche Stop Signal est un exercice classique d'inhibition de la réponse motrice (Logan & Cowan, 1984). L'individu doit réaliser un acte moteur en réponse à un stimulus visuel et ce, le plus rapidement possible. Cependant, un signal sonore, survenant de manière aléatoire, impose l'inhibition de cette réponse, soit via la retenue de l'action qui est au point de s'initier, soit par le retrait du geste déjà engagé (Aron, 2011). Plus précisément, le participant répond sur les boutons à gauche ou à droite de la souris conformément aux flèches pointant vers la gauche ou la droite de l'écran. Dans certains essais, un bip imprévisible et aléatoire annonce que le sujet doit inhiber sa réponse. Ce signal d'arrêt permet d'éviter la mise en place de stratégies, comme retarder l'action pour augmenter la probabilité de l'inhiber (Logan & Cowan, 1984; Rubia et al., 2005). Ainsi, le temps de réponse à la tâche Stop Signal (abrégié SSRT) représente la latence du processus d'arrêt, soit la mise en pratique des capacités inhibitrices (Wang et al., 2016). Le SSRT reflète donc une mesure plus affinée du contrôle inhibiteur que le taux de bonnes réponses, car il s'étaye sur l'algorithme de *tracking* (Rubia et al., 2005). A travers cet algorithme, le premier signal d'arrêt survient quasi immédiatement après le stimulus, ce qui rend certaine l'inhibition de la réponse. Ce délai s'élargit graduellement jusqu'à ce qu'il soit impossible d'arrêter le mouvement initié. Par ailleurs, le délai entre le stimulus et le signal d'arrêt s'ajuste selon les performances du sujet afin de rendre plus difficile l'inhibition de l'action lorsque celle-ci a été réussie précédemment.

La tâche originale présente 48 essais dits « Go », i.e. sans signal sonore, et 16 essais dits « Stop » où le signal sonore intervient, pour un total de 64 essais. Cela représente un ratio de 75% de Go pour 25% de Stop. Dans APEX, cette tâche est précédée de deux entraînements. Le premier constitue une habituation aux boutons-réponse sur 16 essais Go. Le deuxième entraînement propose une version raccourcie de la tâche comptant 16 essais dont 12 Go et 4 Stop. Dans la partie expérimentale, chaque essai débute par un écran noir pendant 500ms, suivi d'une flèche à gauche ou à droite durant 1000ms. Le délai pour la réponse est également de 1000ms. Dans le cas d'un essai « stop », le signal d'arrêt survient entre de 50 à 200ms selon la performance du sujet. Un délai raccourci indique un niveau élevé de difficulté, i.e. une réponse motrice déjà engagée donc plus difficile à arrêter. Un carré de fixation dont le temps d'affichage est également adaptatif – entre 500 à 4000ms – sépare les essais (Figure 25).



**Figure 25.** Tâche Stop Signal, exemple d'essai stop.

#### 4.2.5.5. Prétraitement des données

Les temps de réponse (TR) ont été nettoyés pour chaque participant : les valeurs inférieures à la médiane - 2,5 MAD (Median Absolute Deviation) ou supérieures à la médiane + 2,5 MAD ont été considérées comme aberrantes. Ainsi, pour le Stroop Cognitif, le Stroop Emotionnel, l'ANT et la tâche Stop Signal, des scores plus faibles correspondent à une meilleure efficacité du CI.

#### 4.2.6. Questionnaires démographiques et socio-économiques

Un ensemble de questionnaires ont été remplis par les participants et/ou leurs familles dans le projet APEX afin de fournir un aperçu plus large sur les données comportementales acquises lors des batteries de tests cognitifs.

En pré-test, un questionnaire socio-économique rassemblait des questions sur le métier des parents, leur niveau d'études, le statut marital, le nombre de personnes habitant dans le domicile, le taux de revenus de la famille, entre autres. Ces questions, non obligatoires pour la plupart, permettent d'explorer les conclusions avancées par un certain nombre d'études suggérant que les caractéristiques sociodémographiques et économiques influencent les performances cognitives (Ionescu et al., 1986; Wu et al., 2016). Ce questionnaire était adressé aux parents.

Aussi en pré-test, un questionnaire biographique passait en revue les activités extrascolaires des participants, ainsi que leurs habitudes d'utilisation d'appareils numériques et audiovisuels, e.g. télévision, ordinateur, téléphone portable, tablette, console de jeux vidéo. Ce questionnaire était adressé aux participants et aux parents.

En outre, le Behavior Rating Inventory of Executive Function (BRIEF), un test estimant les fonctions exécutives pour les individus âgés de 5 à 18 ans (Gioia et al., 2000a), permet d'obtenir des informations sur l'emploi quotidien des fonctions exécutives selon le regard des enseignants ou des parents. Il contient 86 items répartis en huit échelles cliniques évaluant différents aspects du fonctionnement exécutif qui se regroupent sous deux indices, i.e. Régulation Comportementale et Métacognition. Un score composite Exécutif Global peut être également obtenu (St. John et al., 2018). Dans le cas d'APEX, les parents ont été invités à remplir ce questionnaire en pré-test.

Les adolescents ont également répondu à une échelle de puberté (Verlaan et al., 2001) en cinq items couvrant les principaux aspects de la puberté. Pour les deux sexes, la poussée de croissance, l'apparition de poils sur le corps et les modifications de la peau, e.g. l'acné, ont fait l'objet des questions. Pour les filles, spécifiquement, le développement des seins et l'apparition des menstruations ont été évalués. Pour les garçons, les interrogations ont concerné les changements dans la voix et la pilosité faciale. Les réponses allaient de "N'a pas encore débuté" à "Semble achevé". Ce document a été proposé uniquement en pré-test.

#### 4.2.7. Questionnaires sur la méditation de pleine conscience

Des questionnaires ont permis un aperçu plus approfondi sur les variations induites par la pratique de la méditation de pleine conscience, comme la gestion émotionnelle. Pour cela, tous ces questionnaires ont été réalisés en pré et posttest. Ainsi, l'échelle « Difficulties in Emotion Regulation Scale » (DERS), en version française, est un document qui comprend 36 items mesurant les difficultés de régulation émotionnelle à travers six dimensions, à savoir (1) « Non-acceptation », qui renvoie à la non-acceptation de la réponse émotionnelle ; (2) « But », correspondant aux difficultés à adopter des comportements orientés vers un but dans un contexte émotionnel négatif ; (3) « Impulsivité », évoquant les difficultés à avoir de l'autocontrôle dans un contexte émotionnel négatif ; (4) « Conscience », qui évalue le manque de conscience émotionnelle ; (5) « Stratégie », pour les difficultés à mettre en place des stratégies de régulation dans un contexte émotionnel négatif ; finalement, (6) « Clarté » : difficultés à identifier ses propres émotions. Dans ce questionnaire, plus le score est élevé, plus le sujet accumule des difficultés de régulation émotionnelle. Compte tenu du lien entre cette régulation et la pratique de méditation de pleine conscience (Hölzel et al., 2011), notamment en ce qui concerne la modification des capacités de gestion des émotions à la suite des exercices méditatifs (Ochsner & Gross, 2005), il nous a semblé essentiel de surveiller ces mesures auprès des adolescents en raison de l'hypersensibilité émotionnelle à cet âge (Casey et al., 2008; Luna & Wright, 2016; Steinberg, 2010).

En outre, afin d'évaluer les aspects trait et état de la pleine conscience, nous avons proposé les questionnaires FFMQ et FMI, décrits antérieurement dans cette thèse. Le FFMQ permet de déceler la tendance générale du sujet à être conscient de ses expériences, ainsi que le caractère multidimensionnel de la pleine conscience. Parallèlement, le FMI, en version raccourcie, pourvoit un autre regard complémentaire sur la tendance à porter une attention sans jugement à l'expérience présent, permettant également de distinguer les novices et les individus expérimentés en méditation (Walach et al., 2006).

#### 4.2.8. Evaluations de la glycémie

Comme nous l'avons présenté dans l'Introduction générale, le taux de glycémie influence la performance du CI (Feldman et al., 2010; Hamelin et al., 2021; Nabb & Benton, 2006; Owens & Benton, 1994). Considérant ces arguments, nous avons mesuré (uniquement chez les adolescents) le taux de glucose sanguin à l'aide d'un glucomètre numérique (Accu-Chek Performa) avant l'IRM et la batterie cognitive, en pré- et posttest. La consommation préalable des boissons sucrées ou de la nourriture sucrée a été notée sur un cahier de bord. De plus, les taux de glycémie supérieurs à 120 mg/dl ont été exclus de l'étude (e.g. Craft et al., 1994).

L'heure de la dernière prise de boissons sucrées ou d'aliments sucrés, ainsi que les heures de passation de la batterie de test cognitifs et des séquences IRM, ont été systématiquement relevées afin d'avoir la possibilité d'évaluer la place de la chronobiologie dans les performances cognitives en pré- et posttest. Ces informations sont nécessaires pour établir des catégories chronobiologiques, i.e. « Proche & Distant des repas », « Matin & Après-midi », conformément à la littérature (Adan et al., 2010; Schmidt & Bao, 2017).

#### 4.2.9. Analyses génétiques

Les échantillons salivaires pour l'étude génétique ont été recueillis en posttest, uniquement. L'ADN a été extrait à partir de la salive récoltée avec le kit de prélèvement salivaire Oragene (DNA Genotek, Inc., Canada) et l'analyse pangénome par génotypage du polymorphisme nucléotidique (SNP), exécutée par la société de service en génomique IntegraGen SA (Genopole, Evry) avec une puce Illumina Infinium Omni2.5-8 sur environ 2.4 millions de SNP.

#### **4.2.10. Journal de bord**

Un journal de bord individuel était également remis aux parents des enfants, ainsi qu'aux adolescents, afin d'assurer un bon suivi de l'entraînement. En introduction, ce carnet rappelait les différentes consignes, telles que privilégier un environnement calme pour les exercices et essayer de les effectuer aux mêmes horaires. Le journal devait être obligatoirement rempli à chaque session d'entraînement.

Pour les enfants, les journaux de bord comprenaient une double page pour chaque séance, i.e. la page de gauche pour l'enfant, la page de droite pour son représentant, en charge du suivi des exercices. Pour les adolescents, une seule page était allouée pour chaque séance. Les informations du journal couvraient la qualité de l'environnement (« Etiez-vous dans le calme ? ») et l'état du sujet (« Etiez-vous concentré/ motivé ? »), les réponses étant cochées sur une échelle de type Likert entre 0 et 5. Les remarques sur la session ont été également encouragées. Toutes ces informations ont été retranscrites en fichier numérisé et croisées avec le nombre de séances enregistrées sur les tablettes afin d'écarter les individus ayant effectué moins de 15 sessions d'entraînement au total.

### **4.3. Exclusion post-entraînement**

Les participants n'ayant pas respecté le nombre minimum de séances d'entraînement n'ont pas pu être inclus dans les analyses sur l'effet des interventions. Cette vérification a été réalisée selon le nombre de séances effectuées, enregistrées sur la tablette et rapportées sur le journal. Dans l'intervention ciblant directement le CI, les participants ayant comptabilisé moins de 15 séances en moyenne, pour les deux tâches d'entraînement, ont été exclus. Dans les autres groupes, le nombre minimum de 15 séances a été imposé pour l'ensemble du programme. Au total, vingt participants (10 enfants et 10 adolescents) ont été exclus en posttest pour ne pas avoir suivi ces consignes. Précisément, neuf adolescents du groupe EC et un adolescent du groupe PC, ainsi que sept enfants du groupe EC et trois enfants du groupe PC ont été supprimés des analyses. De plus, deux participants, i.e. un enfant et un adolescent, ont abandonné le programme avant les tâches en posttest.



## Partie 3 – Etudes expérimentales

---

Considérant que l'efficacité du CI peut être la résultante commune de plusieurs mécanismes physiologiques et neurodéveloppementaux, nous allons aborder dans les études expérimentales les différents facteurs pouvant le façonner. Notre regard est également porté sur la place du CI en tant que compétence pouvant être entraînée par la méditation de pleine conscience, une pratique écologique qui peut s'adresser aux enfants et adolescents.

1

## Etude expérimentale

*Effets sur le contrôle inhibiteur froid et chaud de la méditation de pleine conscience et de l'entraînement cognitif chez les enfants et les adolescents*

*Cette étude est la première, à notre connaissance, à investiguer les effets différentiels de la méditation de pleine conscience et de l'entraînement cognitif sur les spécificités du contrôle inhibiteur lors des contextes comprenant ou non une charge émotionnelle. Nous explorons ces effets sous un regard développemental afin de mettre en exergue les différentes trajectoires de ces compétences durant l'enfance et l'adolescence.*

*Cette étude a donné lieu à la soumission d'un article : **Rezende, G., Le Stanc, L., Menu, I., Cassotti, M., Aïte, A., Salvia, E., Houdé, O., Borst, G., & Cachia, A. (2022). Differential effects of mindfulness meditation and cognitive training on cool and hot inhibitory control in children and adolescents. Article soumis pour publication.***

# **Etude 1 : Effets sur le contrôle inhibiteur froid et chaud de la méditation de pleine conscience et de l'entraînement cognitif chez les enfants et les adolescents**

## **1.1. Introduction**

Le contrôle inhibiteur (CI) est un mécanisme central du développement cognitif et socio-émotionnel (Borst et al., 2015). Plusieurs études ont montré que les capacités de CI dans l'enfance et l'adolescence permettent de prédire la réussite scolaire et professionnelle ultérieure, ainsi que l'adaptation sociale (Diamond, 2013; Kim et al., 2013b; Moffitt et al., 2011). Il est admis que le développement de compétences complexes, telles que la lecture (e.g. Ahr et al., 2016, 2017; Borst et al., 2015; Brault Foisy et al., 2017), l'arithmétique (Blair & Razza, 2007; Roell et al., 2017; Roell et al., 2019; Roell et al., 2019b), le raisonnement (Borst et al., 2015 ; Houdé, 2014b), la théorie de l'esprit (Aïte et al., 2016; Draperi et al., 2022; Marcovitch et al., 2015), la prise de décision (Aïte et al., 2018 ; De Neys et al., 2020 ; Osmont et al., 2014) et la créativité (Camarda et al., 2018; Cassotti et al., 2016) reposent sur l'efficacité accrue du CI.

Le CI peut intégrer différents aspects en fonction du contexte dans lequel il se produit. Par exemple, Zelazo et Carlson (2012) font une distinction entre les aspects neutres et affectifs du CI en fonction du contexte émotionnel. Le CI neutre, également nommé froid, a lieu dans des situations dépourvues d'émotion, étant nécessaire pour résoudre des problèmes qui n'incluent pas de composantes affectives (Fernández García et al., 2021). En revanche, le CI dit chaud se déroule dans des contextes affectivement chargés, liés à un contexte social (Aïte et al., 2018; Metcalfe & Mischel, 1999). Les capacités de CI chaud sont corrélées à la régulation des émotions (Carlson & Wang, 2007), à savoir la capacité à contrôler, évaluer et gérer les émotions (Thompson, 2018). Précisément, le CI chaud intervient dans la dynamique émotionnelle en diminuant ou augmentant les émotions en fonction des situations (Cardinale et al., 2019; Carlson & Wang, 2007; Nigg, 2017; Zelazo & Cunningham, 2007), voire en supprimant une réponse chargée d'affects pour favoriser l'atteinte d'un objectif (Zelazo & Cunningham, 2007). Le CI chaud est également associé à la capacité d'attribuer à autrui des

états affectifs, une capacité cognitive qui sous-tend l'empathie (Draperi et al., 2022). Il convient de noter que la distinction claire entre les capacités de CI froid et de CI chaud n'est pas consensuelle pendant la petite enfance (O'Toole et al., 2018b; Tsermentseli & Poland, 2016). En effet, certains auteurs soutiennent un CI domaine-général pendant les années préscolaires, sans distinction claire entre les capacités de CI froid et chaud à ces âges précoces. Cela est en accord avec le développement des fonctions exécutives, qui se distinguent progressivement au cours du temps (Allan & Lonigan, 2014).

Les capacités de CI froid et chaud se développent de manière linéaire pendant la petite enfance, chez les enfants d'âge scolaire (Hongwanishkul et al., 2005; O'Toole et al., 2018a; Tsermentseli & Poland, 2016). Des formes élémentaires de CI froid – telles que l'inhibition de la réponse motrice, le retrait et la retenue d'une réponse motrice déjà déclenchée, la surveillance de la performance et des conflits – peuvent être observées dès la petite enfance et continuent de progresser à l'adolescence et à l'âge adulte (Rubia et al., 2001, 2007). En parallèle, les compétences de CI chaud ont tendance à se développer plus tardivement et lentement (Aïte et al., 2018; Bouhours et al., 2021a; Metcalfe & Mischel, 1999). Dans ce contexte, l'adolescence représente une période de développement spécifique caractérisée par des compétences de CI chaud inférieures à celles des enfants et des adultes (Durstun et al., 2002; Luna, 2009). Aïte et al. (2018) ont rapporté des trajectoires de développement d'inhibition spécifiques à chaque type, les performances de CI froid s'améliorant linéairement de l'enfance à l'âge adulte et les capacités des CI chaud suivant une trajectoire non linéaire et quadratique. Cette différence peut s'expliquer par le décalage entre un système socio-émotionnel à maturation précoce et un système de contrôle cognitif à maturation plus lente (Casey et al., 2008). Le développement du système émotionnel suivrait une courbe en U inversé (Steinberg, 2008, 2010), avec un traitement sous-cortical limbique-striatal hyperactif (Luciana & Collins, 2012) et une activité dopaminergique accrue (Luna & Wright, 2016). Par conséquent, les régions impliquées dans le CI chaud, comme l'amygdale, seraient particulièrement actives chez les adolescents par rapport aux enfants ou aux adultes (Banich et al., 2019).

Plusieurs études ont rapporté que certaines activités peuvent améliorer le CI (Diamond, 2013; Karbach et al., 2017; Karbach & Kray, 2009; Karbach & Unger, 2014a), notamment la méditation de pleine conscience, une forme d'entraînement mental qui a pour but de développer un ensemble de capacités psychologiques, telles que l'autorégulation attentionnelle et émotionnelle (Tang et al., 2015). La méditation de pleine conscience implique plusieurs fonctions cognitives, dont le CI (Fan et al., 2014; Geronimi et al., 2020; Holas & Jankowski, 2013). En effet, cela requiert le CI pour se concentrer sur un stimulus donné, comme la respiration, tout en laissant aller les pensées ou les sensations qui sont distractives pour atteindre la pleine conscience (Geronimi et al., 2020).

Au début de l'adolescence, Oberle et al. (2012) ont constaté que l'attention mise en place par la méditation de pleine conscience est positivement corrélée aux performances du CI froid. Plusieurs études ont également rapporté une amélioration des fonctions exécutives, y compris du CI, suite à la pratique méditative. Une méta-analyse a également mis en évidence des améliorations spécifiques du CI après la méditation chez les enfants (Takacs & Kassai, 2019), cette pratique étant plus efficace que les programmes entraînant spécifiquement les fonctions exécutives. Dans un échantillon d'adolescents ayant commis des délits, Ron-Grajales et al. (2021) ont observé que la pratique de la pleine conscience est associée à une diminution des erreurs dans la tâche de Stroop et également à une réduction du comportement agressif. D'autres études menées chez des adolescents rapportent un effet positif de la méditation de pleine conscience sur la régulation des émotions mesurée par une réduction des perturbations émotionnelles auto-(Kang et al., 2018; Schonert-Reichl & Lawlor, 2010). Enfin, dans une revue, Leshem et al. (2020) rapportent qu'un entraînement moteur appelé « Quadrato Motor Training », qui incorpore des expériences de pleine conscience en stimulant la conscience des sensations physiques, l'attention et la métacognition, peut améliorer les capacités de CI froid et chaud à tous les âges (De Fano et al., 2019). À noter que Koncz et al. (2021) n'ont trouvé aucun effet de la méditation de pleine conscience sur le CI chez les enfants de l'école primaire.

Si des études précédentes ont rapporté les effets de la méditation de pleine conscience sur le CI froid ou chaud chez les enfants ou les adolescents séparément, à notre connaissance, aucune étude n'a examiné les effets de cette pratique sur les capacités de CI en analysant spécifiquement les dimensions froide et chaude chez les mêmes participants et dans une perspective développementale. Dans ce contexte, le but de notre étude est de comparer les effets sur le CI froid et chaud après 5 semaines de pratique de méditation de pleine conscience

(PC) par rapport à un entraînement cognitif (EC) ciblant le CI chez 129 participants en bonne santé, dont 66 enfants d'âge scolaire (9-10 ans) et 63 adolescents (15-17 ans). Les capacités de CI froid et chaud ont été évaluées par le biais de deux versions de la tâche de Stroop, i.e. le Stroop classique, appelé "Stroop froid", et le Stroop émotionnel, dit "Stroop chaud".

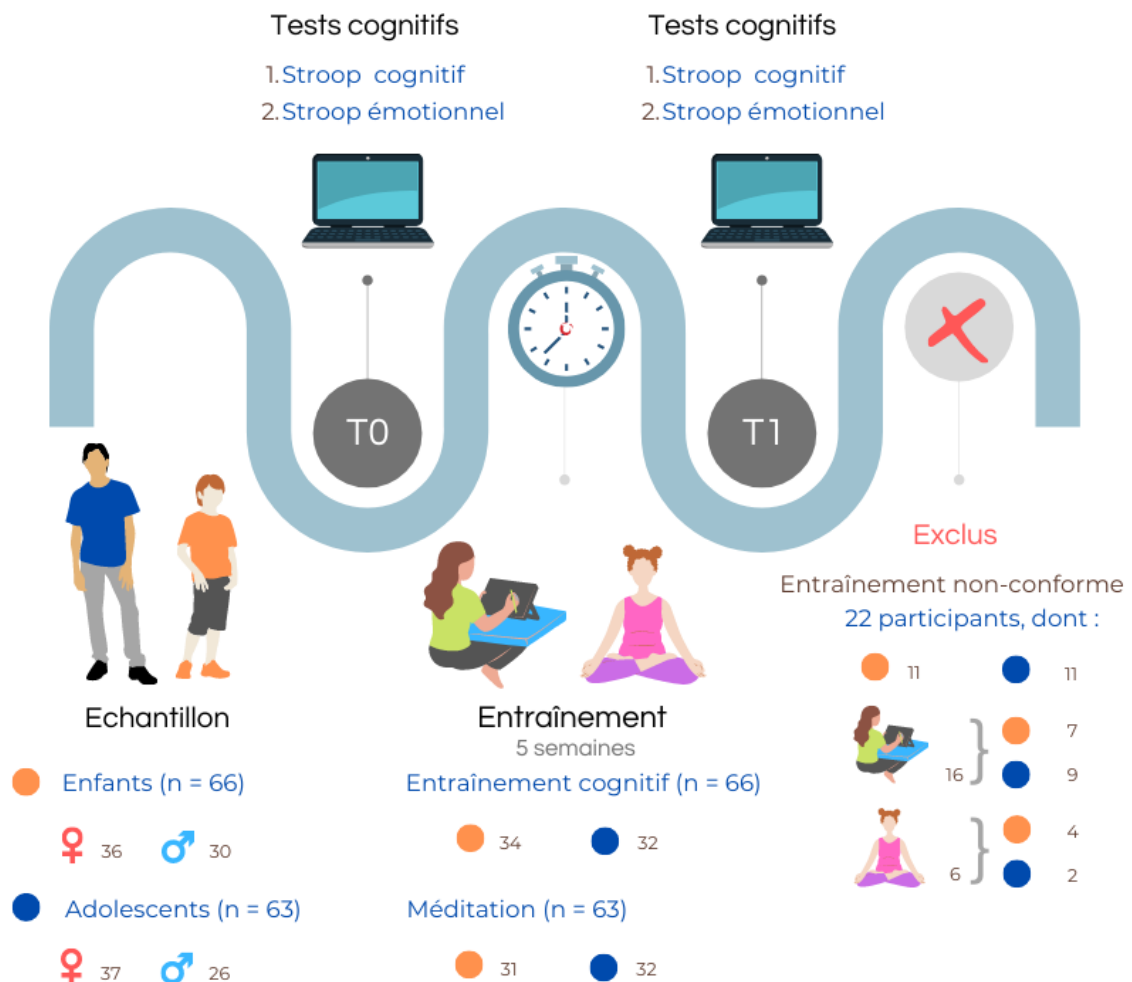
Sur la base d'études précédentes rapportant des trajectoires développementales spécifiques de CI froid et chaud (Aïte et al., 2018; Prencipe et al., 2011; Zelazo & Carlson, 2012), nous anticipons que les effets de la PC et de l'EC seront spécifiques à l'âge des participants (enfants *versus* adolescents) et au type de CI ( froid *versus* chaud). Plus précisément, le CI froid étant déjà très développé chez les adolescents, les enfants devraient bénéficier davantage des interventions que les adolescents. De plus, en raison des compétences de régulation émotionnelle sollicitées par la PC (Hölzel et al., 2011; Schonert-Reichl et al., 2015; Tang et al., 2015), la pratique méditative devrait avoir un effet plus important sur le CI chaud que l'EC, qui cible spécifiquement le CI froid. Inversement, l'effet de l'EC sur le CI froid devrait être plus important que celui suscité par la PC.

## **1.2. Méthode**

### **1.2.1. Participants**

Nous avons recruté 129 participants en bonne santé dans des écoles publiques : 66 enfants (36 femmes,  $M \pm SD = 9,78 \pm 0,50$  ans, fourchette = 9 - 10 ans) et 63 adolescents (37 femmes,  $M = 16,82 \pm 0,54$  ans, fourchette = 16 - 17 ans). Comme nous l'avons déjà précisé, tous les participants étaient droitiers selon le Edinburgh Handedness (Oldfield, 1971), nés à terme, avaient une vision normale ou corrigée, sans antécédent de maladie neurologique ni d'anomalie cérébrale. L'ensemble de critères d'inclusion ont été détaillés précédemment.

Chez les enfants, 32 participants (17 femmes,  $M = 9,78 \pm 0,47$  ans, étendue = 9 - 10 ans) ont été assignés de manière aléatoire au groupe de pratique de la méditation de pleine conscience (PC) et 34 participants (19 femmes,  $M = 9,78 \pm 0,54$  ans, 9 - 10 ans) au groupe d'entraînement cognitif (EC). Parmi les adolescents, 31 participants (16 femmes,  $M = 17,00 \pm 0,51$  ans, éventail = 16 - 17 ans) ont intégré le groupe PC et 32 participants (16 femmes,  $M = 16,64 \pm 0,50$  ans, 16 - 17 ans) au groupe EC. Pour rappel, 20 participants (10 enfants et 10 adolescents) ont été exclus en posttest pour avoir effectué moins de 15 séances d'entraînement en cinq semaines. De plus, deux participants (1 enfant et 1 adolescent) ont abandonné le programme. Les informations sont résumées sur la Figure 1.



**Figure 1.** Aperçu de l'étude avec précisions sur l'échantillon

### 1.2.2. Interventions

Les participants ont été invités à effectuer à la maison soit la méditation de pleine conscience (groupe PC), soit des tâches classiques ciblant directement le CI (désormais abrégée « groupe EC ») 15 min par jour, 5 jours par semaine pendant 5 semaines (25 sessions). Les précisions sur chaque entraînement ont été évoquées dans la Méthode de cette thèse.

### 1.2.3. Évaluation du CI

Les CI froid et chaud ont été évalués à l'aide des tâches Stroop respectivement froid et chaud, selon le protocole détaillé dans Aïte et al. (2018). Pour tous les participants, la tâche Stroop froid a été suivie de la tâche Stroop chaud afin de minimiser la variabilité interindividuelle causée par un effet d'ordre.

Dans chaque tâche, les éléments étaient soit congruents (i.e. sans conflit perceptif entre les stimuli), soit incongruents (i.e. le conflit perceptif entre les stimuli devait être inhibé afin de produire une réponse correcte). À chaque essai, le temps de réponse (TR) a été mesuré entre l'apparition du stimulus et la pression sur le bouton. Pour chaque participant, nous avons calculé les TR moyens en millisecondes sur les essais correctement réalisés pour les items congruents et incongruents. Dans la condition incongruente, seuls les essais présentant une incongruence à la fois perceptives et motrices (bouton de réponse différent pour la cible et le distracteur) ont été considérés car il était impossible de déterminer la précision de la réponse lors des essais présentant uniquement une incongruence perceptive (bouton de réponse identique pour la cible et le distracteur). À l'instar d'études développementales rapportant que les scores d'interférence sont plus sensibles sur la base des TR que les taux de précision (Aïte et al., 2018 ; Klenberg et al., 2015), nous rapportons des résultats sur les TR.

Il convient de noter que la dimension affective des tâches de Stroop émotionnel a été débattue (e.g. Algom et al., 2004). Une étude d'IRM chez des adolescents a fourni des preuves du traitement réel et spécifique des informations affectives véhiculées par cette tâche (Fehlbaum et al., 2018). En effet, le Stroop chaud semble pouvoir saisir les processus liés aux émotions au-delà des capacités cognitives plus générales (Smolker et al., 2022).



#### 1.2.4. Analyses statistiques

Dans chaque tâche, le score de Stroop, également appelé score d'interférence – correspond à la différence de temps de réponse entre les éléments congruents et incongruents (perceptifs et moteurs). Nous avons calculé le score d'interférence avant et après l'entraînement pour les tâches de Stroop froid et chaud pour chaque participant. Un score de Stroop plus faible correspond à une meilleure efficacité du CI.

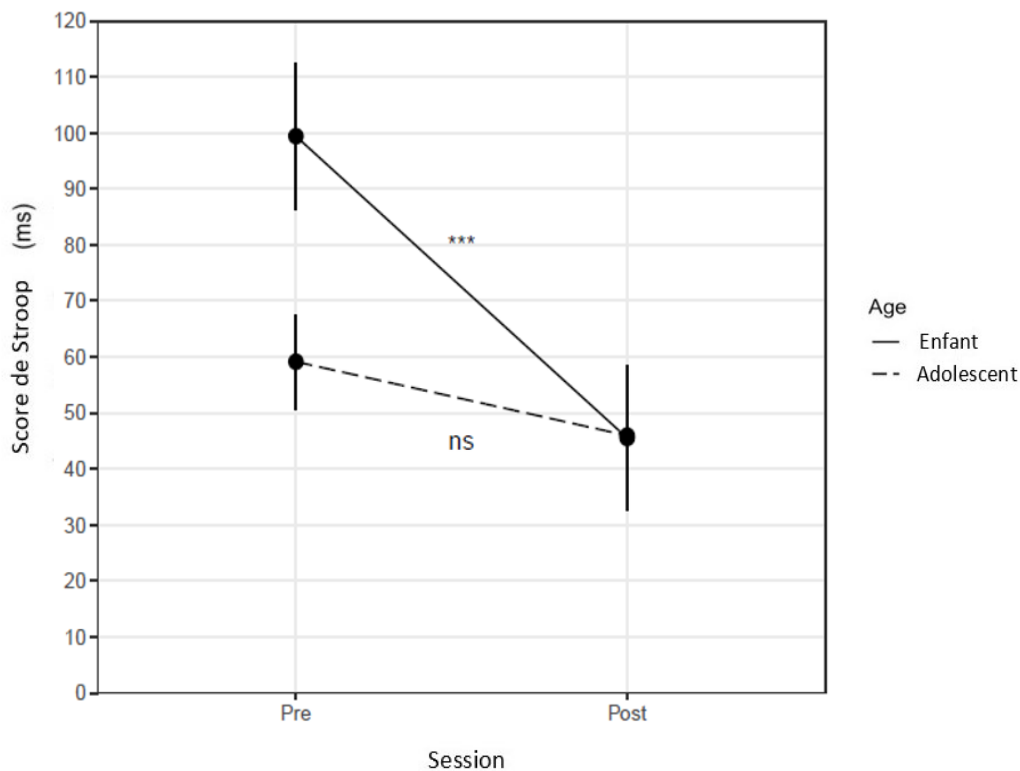
Nous avons d'abord ajusté un modèle linéaire à effets mixtes sur le score de Stroop avec la session (pré-test vs posttest) et le type de conflit (froid vs chaud) comme facteurs intra-sujet, le groupe d'intervention (EC vs PC) et le groupe d'âge (enfant vs adolescent) comme facteurs inter-sujet et les participants comme facteur aléatoire. Ces modèles à effets mixtes sont adaptés pour gérer les données manquantes dans les modèles à mesures répétées. Nous avons ensuite effectué une analyse de la variance (ANOVA) pour évaluer les effets principaux et leurs interactions, puis des comparaisons post-hoc corrigées par FDR. Nous avons également testé a priori l'effet lié au temps pour chaque groupe d'âge et d'intervention et chaque type de conflit en utilisant des comparaisons planifiées.

Les effets principaux et les interactions ont été vérifiés à l'aide de tests chi carré de Wald, de tests post-hoc et de comparaisons planifiées à l'aide de tests Z. Une valeur p bilatérale inférieure à 0,05 a été considérée comme statistiquement significative. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R 4.1.0 (<http://www.r-project.org/>) et les packages "tidyverse", "car", "multcomp" et "lme4" pour le traitement des données et l'analyse des modèles linéaires à effets mixtes.

### 1.3. Résultats

Comme attendu, il n'y avait pas de différence entre les groupes avant l'intervention ni pour la tâche Stroop froide - Enfants :  $Z = 1,55$ ,  $p = 0,12$ , et Adolescents :  $Z = -0,81$ ,  $p = 0,42$  - ni pour la tâche Stroop chaude - Enfants :  $Z = -0,31$ ,  $p = 0,76$ , et Adolescents :  $Z = -0,80$ ,  $p = 0,43$ .

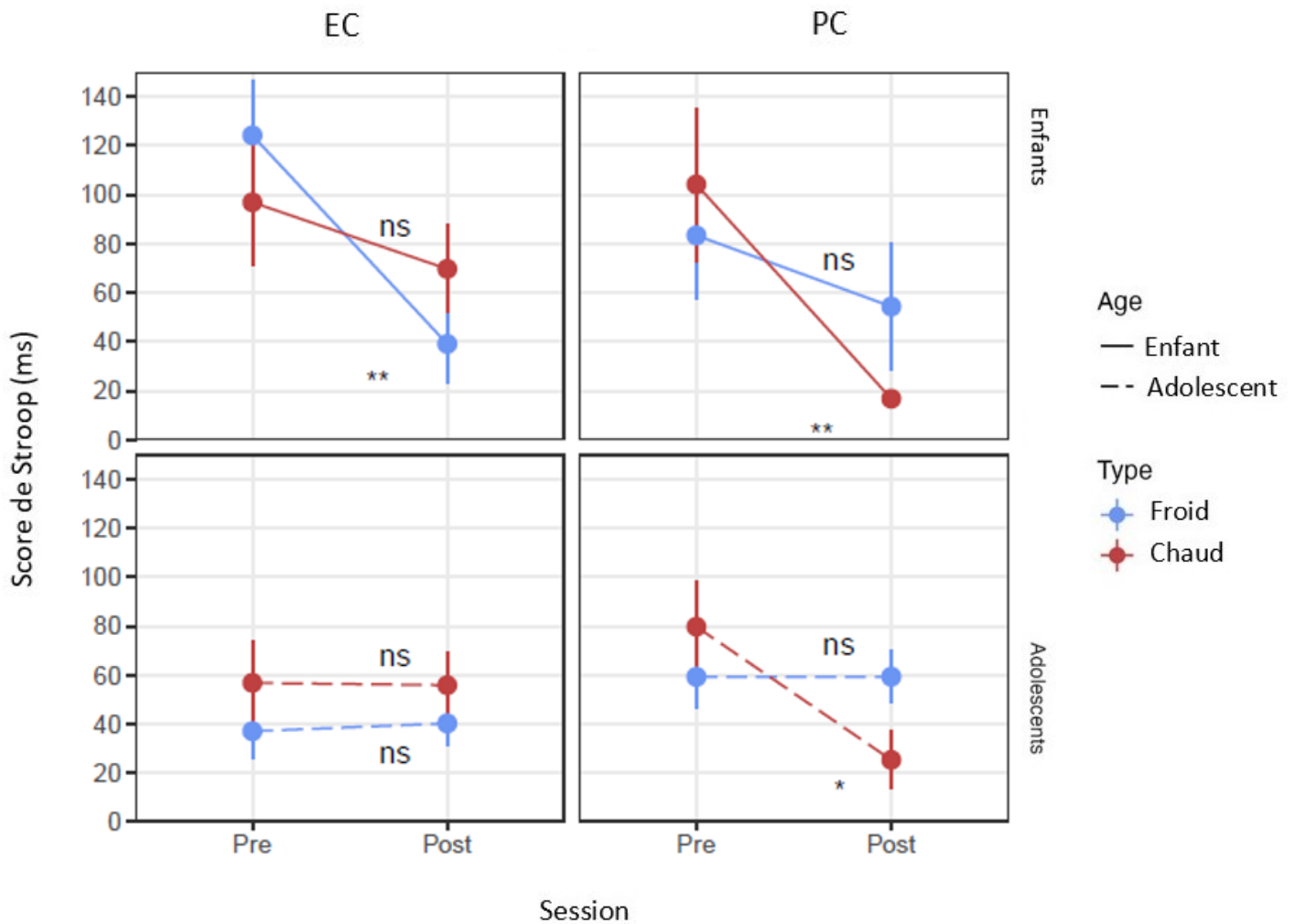
Le modèle à effets mixtes sur les scores de Stroop a révélé un effet principal significatif du groupe d'âge  $\chi^2(1) = 4.94, p < 0.05$ , avec de meilleures performances chez les adolescents par rapport aux enfants (Figure 2), ainsi qu'un effet principal significatif de la session,  $\chi^2(1) = 12.66, p < 0.001$ , avec de meilleures performances au posttest par rapport à la session de pré-test. Les analyses ont également révélé une interaction tridimensionnelle entre la session, le type de conflit et le groupe d'intervention,  $\chi^2(1) = 4.42, p = 0.04$ , indiquant différents changements liés au Temps selon le groupe d'intervention et le Type de conflit. De plus, nous avons observé une interaction bidirectionnelle significative entre la session et le groupe d'âge,  $\chi^2(1) = 4.66, p = 0.03$ , avec des changements liés à la session, spécifiques à l'âge (Figure 2). Les autres effets principaux et interactifs n'étaient pas significatifs (tous les ps >0.20).



**Figure 2.** Les données représentent le score moyen de Stroop (différence entre les TR en conditions congruentes et incongruentes) en millisecondes chez les enfants (ligne continue) et les adolescents (ligne pointillée) à travers les types de conflit (Stroop froid et Stroop chaud) et les groupes d'intervention (entraînement cognitif et pratique de la méditation de pleine conscience). Les barres d'erreur indiquent l'erreur standard par rapport à la moyenne (s.e.m.). ns :  $p > 0,05$  ; \*\*\* :  $p < 0,001$ .

Les comparaisons post-hoc ont révélé que l'efficacité du CI des enfants s'améliore entre le pré et le posttest ( $\beta = -57.24 \pm 14.18$ ,  $Z = -4.04$ ,  $p_{FDR} < 0.001$ ) mais pas celle des adolescents ( $\beta = -13.38 \pm 14.45$ ,  $Z = -0.93$ ,  $p_{FDR} = 0.35$ ) (Figure 2). En outre, les performances de CI des enfants étaient inférieures à celles des adolescents lors du pré-test ( $\beta = -43.57 \pm 14.20$ ,  $Z = -3.07$ ,  $p_{FDR} < 0.01$ ) mais pas lors du posttest ( $\beta = 0.31 \pm 15.84$ ,  $Z = 0.02$ ,  $p_{FDR} = 0.98$ ) (Figure 2). Enfin, l'EC a exhibé un effet tendanciel sur l'efficacité du CI froid ( $\beta = -41.33 \pm 20.27$ ,  $Z = -2.04$ ,  $p_{FDR} = 0.09$ ) mais aucun effet n'a été rapporté sur le CI chaud ( $\beta = -14.60 \pm 20.13$ ,  $Z = -0.73$ ,  $p_{FDR} = 0.48$ ) tandis que la PC a amélioré l'efficacité du CI chaud ( $\beta = -71.32 \pm 20.35$ ,  $Z = -3.51$ ,  $p_{FDR} < 0.01$ ) mais pas celle du CI froid ( $\beta = -13.99 \pm 20.03$ ,  $Z = -0.70$ ,  $p_{FDR} = 0.48$ ).

Les comparaisons planifiées concernant les changements liés au temps pour chaque groupe d'âge et d'intervention et chaque type de conflit (Figure 4) ont révélé que le CI chaud des enfants s'est amélioré du pré-test au posttest après la PC ( $\beta = -88.99 \pm 29.42$ ,  $Z = -3.02$ ,  $p_{FDR} < 0.01$ ) et que le CI froid des enfants s'est amélioré du pré-test au posttest après l'EC ( $\beta = -85.04 \pm 27.30$ ,  $Z = -3.11$ ,  $p_{FDR} < 0.01$ ). Chez les adolescents, les analyses ont indiqué un léger changement sur l'efficacité du CI chaud entre le pré-test et le posttest après la MM ( $\beta = -53.66 \pm 28.11$ ,  $Z = -1.91$ ,  $p = 0.05$ ). Cependant, cet effet a disparu à la suite de la correction FDR pour comparaisons multiples ( $p_{FDR} = 0.15$ ). Les autres changements liés aux sessions n'ont pas atteint le seuil de significativité (tous les  $ps > 0.54$ ).



**Figure 4. Changements dans le Stroop froid et chaud après l'entraînement cognitif (EC) et la pratique de la méditation de pleine conscience (PC) chez les enfants et les adolescents.** Les données représentent le score moyen de Stroop (différence entre les TR dans les conditions congruentes et incongruentes) en millisecondes dans les tâches de Stroop froid (bleu) et chaud (rouge) chez les enfants (ligne continue) et les adolescents (ligne pointillée). Les barres d'erreur indiquent l'erreur standard par rapport à la moyenne (s.e.m.). ns.:  $p > 0.05$ ; \* :  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p_{FDR} < 0.01$ .

Les détails concernant le score de Stroop ainsi que le TR dans des conditions congruentes et incongruentes dans les différents groupes d'âge et d'intervention pour les tâches de Stroop froid et chaud figurent dans l'article présenté en Annexes 5 (Tableau 1).

## 1.4. Discussion

Dans cette étude, nous avons examiné l'effet de deux interventions, la méditation de pleine conscience et l'entraînement cognitif, sur le contrôle inhibiteur cognitif et émotionnel chez des enfants et des adolescents au développement typique. Chez les enfants, le CI froid s'est amélioré après l'entraînement des capacités de CI froid, et le CI chaud s'est amélioré après la pratique de la méditation de pleine conscience. Chez les adolescents, seul le CI chaud s'est amélioré, et ce après la pratique de la pleine conscience. En outre, les enfants ont bénéficié davantage que les adolescents des deux types d'entraînement, conformément aux études précédentes (Constantinidis & Luna, 2019; Geier & Luna, 2012; Karbach, 2008; Karbach & Kray, 2009). Par conséquent, notre étude fournit des preuves d'effets spécifiques à l'âge et à l'intervention sur les capacités d'inhibition froide et chaude chez les enfants et les adolescents.

Le design de notre étude prend en compte les recommandations soulevées par les études d'entraînement exécutif (Karbach, 2016). Premièrement, l'entraînement informatisé a été réalisé sur une tablette tactile standard, de sorte qu'il pouvait être facilement intégré dans la routine quotidienne du participant. Cet aspect s'est avéré particulièrement bénéfique pour l'intervention de pleine conscience, car elle pouvait être menée dans des environnements calmes et spacieux, choisis par les participants eux-mêmes, où ils se sentaient à l'aise, en toute intimité, pour effectuer les exercices. Deuxièmement, l'entraînement cognitif et la tâche d'évaluation du CI froid étaient quelque peu différents afin de distinguer les améliorations réelles du simple effet d'entraînement de la tâche (Aydmune et al., 2019; Traverso et al., 2015). Troisièmement, il est important de mentionner que les compétences en CI froid et en CI chaud ont été évaluées avec deux versions différentes de la même tâche, afin de limiter, autant que possible, des biais potentiels.

Nos résultats ont révélé des effets positifs de la PC sur les capacités de CI chaud chez les enfants et les adolescents. Étant donné que le CI chaud et la régulation des émotions sont liés (Goeleven et al., 2006; Zelazo & Cunningham, 2007), nos résultats sont cohérents avec les études précédentes rapportant des effets positifs de la pleine conscience sur l'empathie et le comportement de compassion, deux compétences prosociales dépendant de la régulation émotionnelle et de l'autorégulation program (Creswell, 2017; Schonert-Reichl et al., 2015). En

effet, certaines études ont révélé que les compétences interpersonnelles, le comportement prosocial, la compassion et l'empathie s'améliorent davantage à la suite de programmes basés sur la pleine conscience en comparaison à des interventions classiques (Creswell, 2017; Schonert-Reichl et al., 2015). Par exemple, dans un essai contrôlé randomisé en milieu scolaire auprès d'enfants de 9 à 11 ans pendant quatre mois, Schonert-Reichl et al. (2015) ont constaté que le programme appelé MindUP, comprenant des exercices de méditation de pleine conscience, a développé davantage le comportement prosocial qu'un programme social régulier. Récemment, Dunning et al. (2022) ont réalisé une méta-analyse sur des essais contrôlés randomisés de programmes basés sur la pleine conscience chez les enfants et les adolescents (<19 ans), incluant un nombre suffisant d'études puissantes et d'études ayant un suivi. Dans l'ensemble des essais, ces interventions ont entraîné des améliorations faibles mais significatives par rapport aux témoins en ce qui concerne les propriétés de pleine conscience, i.e. l'habileté à diriger son attention aux expériences du moment présent, les fonctions exécutives, l'attention, les comportements négatifs (e.g. l'agression), la dépression et l'anxiété/le stress, mais pas le bien-être ou le comportement prosocial (e.g. l'empathie). En comparaison aux groupes de contrôle actif, ces interventions ont amélioré seulement les propriétés de pleine conscience et les symptômes d'anxiété, confirmant une méta-analyse précédente (Dunning et al., 2019a). Néanmoins, ces programmes ont été efficaces pour améliorer le stress, l'attention, les fonctions exécutives, les comportements négatifs et les conduites sociales uniquement par rapport aux groupes de contrôle passif. Les auteurs mettent également en exergue une surestimation générale des effets des interventions basées sur la méditation de pleine conscience, ceux-ci étant sujets à des risques potentiels de biais, comme le biais de publication. Ainsi, les bénéfices assurés de la pleine conscience sur la cognition et le bien-être ont été considérées "faibles" ou "très faibles" contemplant l'ensemble d'études analysées (Dunning et al., 2022).

Toutefois, notre étude soutient les avantages d'une intervention de méditation par rapport à un entraînement exécutif froid pour améliorer la régulation émotionnelle chez un jeune public. Ceci est particulièrement important dans un contexte scolaire. Les interventions de pleine conscience à l'école peuvent produire des effets positifs contre le harcèlement chez les enfants (Faraji et al., 2019) et les adolescents (Liu et al., 2021), une préoccupation majeure à l'école. Dans une étude récente, Kuroda et al. (2022) ont fourni des preuves que la pleine conscience en tant que prédisposition est positivement associée au plaisir d'apprendre et

négalement associée à l'anxiété et au mind-wandering, i.e. le vagabondage de l'esprit, chez les collégiens. Agir avec conscience soutient l'autorégulation bottom-up de l'apprentissage. Précisément, cela favorise l'attention de l'étudiant de manière graduelle, réduisant l'errance mentale et augmentant indirectement les émotions positives (Killingsworth & Gilbert, 2010), comme le plaisir d'apprendre. Des avantages similaires, e.g. l'amélioration des compétences de gestion du stress, de la conscience de soi, de la gestion des émotions et de la capacité d'attention, ont été observés après huit semaines d'un programme scolaire de méditation de pleine conscience dans un lycée alternatif, destiné à des élèves présentant des difficultés scolaires, sociales et émotionnelles. Ces effets ont influencé le climat scolaire, renforçant l'engagement de la classe (Wisner, 2014). De tels bénéfices sur les aspects intrapersonnels et psychosociaux sont cruciaux dans ce type d'environnement scolaire souvent caractérisé par des taux de décrochage élevés (Doll et al., 2013). À noter qu'une revue récente (Sleilaty, 2022) souligne également que la pratique de la pleine conscience en milieu scolaire peut avoir des effets non seulement sur les élèves mais aussi sur les éducateurs. Les effets les plus robustes ont été rapportés sur le bien-être, caractérisés par une diminution du stress, de l'anxiété et de la dépression. Les résultats indiquent également des effets significatifs sur la régulation des émotions et la compassion chez les éducateurs, ce qui peut également affecter le climat social en milieu scolaire. Inversement, les résultats récents du projet MYRIAD (My Resilience in Adolescence), un large essai contrôlé randomisé en cluster, e.g. Montero-Marin et al. (2022), exposent l'absence d'effet de la pratique de la pleine conscience sur la santé mentale des élèves de 14 ans en moyenne. Cette étude met également l'accent sur les effets négatifs observés chez les individus présentant des troubles de l'humeur existants ou émergents, e.g. la pleine conscience pourrait alors renforcer les pensées négatives lors des états dépressifs (Montero-Marin et al., 2022).

A noter que les résultats relevés peuvent dépendre de la manière dont la pratique de la pleine conscience a été implémentée dans les écoles par les enseignants, ainsi que l'échantillon testé. De surcroît, des suggestions ont été avancées par les études basées sur l'essai MYRIAD pour accroître l'efficacité et la durabilité des interventions de pleine conscience, en particulier dans les écoles (Kuyken et al., 2022; Montero-Marin et al., 2022). Par exemple, au niveau de l'école, les facilitateurs et les obstacles à la mise en œuvre du programme méritent une attention particulière pour obtenir une conception optimale. Au niveau de l'intervention elle-même, la fidélité, la crédibilité et l'engagement peuvent

influencer les résultats. Pour les élèves, l'état de santé mentale et l'âge/le stade de développement, ainsi que les trajectoires personnelles, sont des éléments cruciaux pour la conception et la mise en œuvre d'un programme de pleine conscience. De même, les influences externes sur le bien-être des jeunes, comme les inégalités sociales, sont des déterminants majeurs de la santé mentale au niveau sociétal. Ce sont des suggestions avancées par l'étude MYRIAD, déjà évoquée, qui n'a trouvé aucune preuve en faveur d'un programme basé sur la pleine conscience en comparaison à des interventions standard en milieu scolaire chez les jeunes (âgés de 11 à 16 ans), précisément en ce qui concerne les compétences socio-émotionnelles (Kuyken et al., 2022; Montero-Marin et al., 2022). Conformément à ces suggestions, une méta-analyse récente (Dunning et al., 2022) a mis en évidence des modérateurs des effets des interventions basées sur la pleine conscience en milieu scolaire. Les auteurs ont indiqué qu'un taux plus important de pratique de la pleine conscience entraîne une amélioration plus marquée des compétences cognitives et socio-émotionnelles, les résultats étant donc dépendants du taux de pratique. De plus, l'âge est un modérateur significatif des changements dans l'anxiété/le stress, ainsi que la propension à être conscient de ses pensées et ses actions. Il convient de noter que les enfants ont tendance à bénéficier davantage de ces interventions que les adolescents (Dunning et al., 2022).

Notre étude suggère également que l'EC peut être particulièrement bénéfique pour les enfants, ce qui est cohérent avec des preuves antérieures que les enfants de la même tranche d'âge que la nôtre (8-12 ans) peuvent montrer une grande amélioration du CI après un entraînement cognitif ciblant spécifiquement les compétences d'inhibition (Diamond & Lee, 2011b). Parallèlement, une limitation potentielle de notre étude est l'absence d'évaluation de transfert lointain, bien que cela soit essentiel pour comprendre le rôle de l'entraînement au-delà des capacités entraînées, et principalement si l'entraînement proposé est envisageable dans le milieu académique. En effet, des preuves convergentes soutiennent que l'entraînement au CI pourrait améliorer certaines capacités scolaires chez les enfants au développement typique (Karchach, 2016). Par exemple, Wilkinson et al. (2020) ont intégré l'entraînement au CI au programme scolaire national de mathématiques et de sciences en Angleterre. Cette intervention visait à entraîner les enfants à utiliser leurs compétences d'inhibition en classe (e.g., apprendre à retenir des réponses prépotentes à des concepts contre-intuitifs). Des effets de transfert ont été observés après l'intervention, c'est-à-dire que



certains enfants ont pu utiliser la technique consistant à s'arrêter et à évaluer des concepts nouveaux et inédits plutôt que simplement mémoriser les bonnes réponses.

L'amélioration des capacités du CI chaud chez les adolescents après la pratique de méditation est uniquement soutenue par des analyses non ajustées pour des comparaisons multiples. Malgré cette limite, ce résultat spécifique peut fournir des preuves préliminaires d'un traitement socio-émotionnel spécifique durant cette étape de la vie. Des preuves convergentes ont montré que le déséquilibre entre le système de contrôle et le système socio-émotionnel (Ernst et al., 2006; Fuhrmann et al., 2015) peut être potentiellement « rééquilibré » par des interventions à l'adolescence qui améliorent les fonctions exécutives et l'autorégulation, comme la méditation de pleine conscience (Tang et al., 2015). L'hypothèse des effets de compensation rejoint cet argument, i.e. des performances de base plus faibles sont liées à des gains d'entraînement plus importants (Karbach & Unger, 2014a). Étant donné que les adolescents ont présenté une performance de CI chaud plus faible que celle du CI froid, ils ont été peut-être plus réceptifs aux bénéfices de la pratique méditative que de l'entraînement cognitif, avec des gains plus marqués au fil du temps (Karbach, 2016; Karbach & Unger, 2014a). Cela s'accorde avec la conclusion selon laquelle les programmes basés sur la pleine conscience sont plus susceptibles de modifier le comportement social que le fonctionnement exécutif froid à la fin de l'adolescence (Dunning et al., 2022).

Dans notre étude, aucun changement significatif, que ce soit dans le CI cool ou chaud, n'a été rapporté chez les adolescents après dans le groupe EC. Cette absence de changement comportemental peut être liée à différents facteurs, notamment les performances de base et la motivation (Karbach et al., 2017). Considérant que les adolescents ont obtenu de bien meilleures performances que les enfants lors du pré-test, l'absence de progrès significatifs après l'EC peut être due au fait que 1) l'EC n'offrait pas un niveau de difficulté suffisamment élevé et/ou 2) cet entraînement a fait appel à des capacités cognitives (c'est-à-dire des compétences d'inhibition froide) déjà développées, laissant peu de place aux progrès (Karbach, 2016). Il est à noter que l'absence de changement chez les adolescents après l'EC est conforme aux études développementales rapportant que les compétences en CI sont moins enclines à changer pendant l'adolescence que pendant l'enfance (Geier & Luna, 2012; Holmboe et al., 2021; Rueda et al., 2005). Les facteurs motivationnels jouent également un rôle essentiel dans l'entraînement cognitif, et particulièrement à l'adolescence (Beauchamp et al., 2016, 2019) car cette période est caractérisée par une réactivité accrue à la récompense

(Casey et al., 2008, 2011; Constantinidis & Luna, 2019; Geier et al., 2010; Steinberg, 2010). Dans ce contexte, il est important de mentionner que l'interface informatisée de l'entraînement que nous avons proposé était similaire pour les enfants et les adolescents afin de contrôler d'éventuels biais. Cependant, la gamification a pu être trop enfantine pour les adolescents, limitant ainsi leur motivation au cours de l'intervention de cinq semaines. De même, Beauchamp et al. (2019) ont évoqué un possible problème de motivation pour expliquer l'absence de changement de CI chez les adolescents après une intervention d'entraînement cognitif de cinq semaines.

Il est essentiel de souligner l'originalité de cette étude, qui est la première, à notre connaissance, à montrer que l'entraînement cognitif et la méditation de pleine conscience ont des effets différentiels et complémentaires sur les capacités de CI froid et chaud. Dans le futur, il pourrait être intéressant de combiner ces deux interventions pour entraîner les capacités de CI froid et chaud chez les enfants et les adolescents.

En conclusion, divers critères doivent être pris en considération pour que les interventions de méditation de pleine conscience soient efficaces et robustes, comme nous l'avons déjà souligné. Cependant, l'intégration de cette pratique à l'école peut être un moyen d'améliorer les compétences non techniques, notamment l'empathie, qui, à son tour, peut limiter le harcèlement (Beauchemin et al., 2008; Diamond, 2012; Flook et al., 2010; Jenkins et al., 2018) et plus généralement réduire les mauvais comportements. La mise en œuvre de ces interventions à un jeune âge est prometteuse, étant donné la réceptivité des enfants à l'entraînement cognitif. De plus, son introduction à un jeune âge peut influencer la réussite professionnelle ultérieure, l'engagement social et le bien-être futur.

# 2

## Etude expérimentale

*L'influence du taux de glucose sanguin et de l'indice de masse corporelle sur l'efficacité du contrôle inhibiteur chez les adolescents avant et après entraînement*

*La physiologie peut également influencer l'efficacité et la réceptivité à l'apprentissage au CI, et cela peut être d'autant plus marqué pendant l'adolescence en raison de tous les changements subis par l'organisme. Dans cette étude, nous évaluons la place des mesures physiologiques à la fois dans l'efficacité inhibitrice et dans la capacité à bénéficier d'un entraînement au CI, soit par voie directe, soit via la méditation de pleine conscience.*

## **Etude 2 : L'influence du taux de glycémie sanguine et de l'indice de masse corporelle sur l'efficacité du contrôle inhibiteur chez les adolescents avant et après entraînement**

*Pour cette étude, nous nous focalisons sur le sous-groupe d'adolescents pour lesquels une mesure du taux de glucose sanguin a été obtenue.*

### **2.1. Introduction**

Le glucose étant la principale source énergétique du cerveau, les zones cérébrales sollicitées par une activité donnée demandent un apport glycémique conformément à leurs besoins métaboliques pour que l'action soit accomplie (Kelly et al., 2015). Cela s'applique également à l'effort cognitif, les tâches les plus complexes requérant un apport de glucose correspondant (Scholey et al., 2001). Ainsi, diverses études se sont penchées sur le lien entre la cognition et le glucose chez le sujet sain et clinique (e.g. Anderson et al., 2006; Crochiere et al., 2019; Graveling et al., 2013; Palta et al., 2014). Certaines recherches ont exploré les effets de la régulation glycémique, i.e. le processus par lequel le taux de glucose sanguin est maintenu dans une fourchette étroite de valeurs bénéfiques pour l'organisme afin de garder l'homéostasie (e.g. Bich et al., 2020). Ce processus fait intervenir le système hormonal et des boucles de rétroaction, ainsi que le pancréas, le foie et les reins (Bich et al., 2020; Geijselaers et al., 2015). Pour l'étudier, le jeûne et l'ingestion des boissons glucosées sont des techniques couramment employées, permettant de vérifier le pic et la stabilisation du niveau de glucose dans le temps (Geijselaers et al., 2015). Parallèlement, d'autres études se sont penchées sur le taux aléatoire de glucose, i.e. la valeur instantanée du sucre sanguin à un moment donné, sans considérer la dernière prise alimentaire (Kayo et al., 2012).

La littérature indique que l'hypoglycémie (<3.0 mmol/L ; 54 mg/dL) s'associe à une dégradation des performances cognitives, en particulier exécutives (Graveling et al., 2013). Par exemple, Bartholdy et al. (2016) ont observé une diminution de la précision des réponses à la tâche Stop Signal après une restriction alimentaire aiguë qui entraîne une diminution du glucose sanguin. Dans une tâche de délai des gratifications, la baisse glycémique a reflété des choix plus marqués sur des récompenses immédiates, moins intéressantes, en comparaison aux récompenses futures, plus attirantes. Cette détérioration a été également observée sur la performance au Stroop lors d'une hypoglycémie contrôlée expérimentalement (Evans et al., 2000). Malgré les différents niveaux euglycémiques au départ, la chute aiguë du glucose sanguin a entraîné un rallongement des temps de réponse au Stroop avant la prise de conscience des symptômes cliniques dus à l'hypoglycémie. De plus, la récupération de l'efficacité cognitive a été plus lente que le rétablissement des taux de glucose. Tout de même, une amélioration de la vitesse des réponses est souvent rapportée après l'ingestion des boissons glucosées en cas de chute glycémique (Benton et al., 1994; Owens & Benton, 1994).

Conjointement, des évidences croissantes indiquent un lien entre un autre facteur physiologique en rapport avec l'alimentation – l'indice de masse corporelle (IMC) – et la cognition. En effet, de nombreuses études se sont penchées sur la relation entre l'IMC et la performance cognitive, notamment chez les adultes (Gunstad et al., 2007; Hawkins et al., 2016). Par exemple, Marioni et al. (2016) rapportent l'association entre un IMC élevé et des performances cognitives affaiblies en identifiant des contributions génétiques communes à ces traits dans une étude sur une large cohorte d'individus non apparentés, ethniquement homogène. De surcroît, Gunstad et al. (2007) ont observé une corrélation négative entre l'IMC et la performance aux tâches exécutives, telles qu'une version modifiée du Stroop, chez une cohorte d'adultes entre 20 et 82 ans. En contrôlant pour le surpoids et l'obésité, un IMC élevé a été associé à une performance exécutive affaiblie, et cela indépendamment de la tranche d'âge chez les adultes étudiés. Les auteurs interprètent ces résultats avec précaution, mettant en exergue qu'un IMC élevé est souvent lié à des conditions physiologiques susceptibles d'influencer négativement le fonctionnement cognitif, e.g. des atteintes vasculaires dont une diminution de la capacité cardiovasculaire, des anomalies de régulation de l'insuline, entre autres (Gunstad et al., 2007). En contrepartie, il est aussi possible que les individus ayant des fonctions exécutives moins performantes soient plus enclins à avoir du surpoids ou de l'obésité, ce qui implique un IMC élevé. Par exemple, dans une revue, Yang et al. (2018)

indiquent que les adultes présentant de faibles capacités exécutives sont particulièrement susceptibles d'adopter des comportements liés à la prise excessive de poids, tels que la consommation élevée d'aliments gras et riches en calories. De plus, des compétences affaiblies d'autorégulation, i.e. les efforts conscients ou inconscients pour gérer son comportement, chez les enfants âgés de deux ans ont été prédictives d'un risque important de surpoids ou d'obésité à l'âge de cinq ans (Graziano et al., 2010).

Il est également important de souligner que la littérature rapporte des effets spécifiques de l'obésité sur les fonctions exécutives, comme l'indique une méta-analyse attestant des déficits importants d'inhibition, de flexibilité cognitive, de mémoire de travail, de fluidité verbale et de planification chez les individus obèses et en surpoids (Yang et al., 2018). Ces auteurs indiquent que le seul modérateur des effets observés est la tâche employée pour évaluer la performance cognitive. Dans une étude précédente, Duchesne et al. (2010) ont signalé un impact négatif de l'obésité sur des tests exécutifs tels que l'empan de chiffres à l'envers sur la mémoire de travail. Cependant, les chercheurs n'ont pas observé de lien entre l'IMC et l'efficacité du CI lors du Stroop.

Par ailleurs, la relation entre l'IMC et la cognition semble être plus nuancée chez les jeunes que dans des populations plus âgées (Gunstad et al., 2008; Lam & Yang, 2007). En effet, Lam & Yang (2007) ont évalué le risque potentiel de prévalence du trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH), selon les critères du Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux en vigueur à l'époque (DSM-IV), chez une cohorte d'adolescents chinois entre 13 et 17 ans en fonction de l'IMC. Cette étude a révélé une corrélation significative entre un schéma comportemental à risque de TDAH et l'obésité, i.e. un IMC supérieur à 30 kg/m<sup>2</sup> d'après les critères établis par le Centre for Disease Control and Prevention. A l'inverse, Gunstad et al. (2008) n'ont observé aucune relation entre l'IMC élevé et la performance cognitive chez 478 enfants et adolescents, âgés de 6 à 19 ans, ayant un développement typique sans comorbidité. Bien qu'aucun lien n'ait été observé pour l'IMC élevé, un IMC faible a été associé à une performance mnésique amoindrie, uniquement chez les femmes, selon les résultats de mémorisation d'une liste de mots (Gunstad et al., 2008). Parallèlement, une étude portant sur le profil cognitif et le poids chez les enfants et les adolescents souffrant d'anorexie mentale, i.e. IMC inférieur au 15<sup>ème</sup> percentile (Substance Abuse and Mental Health Services Administration, 2016), n'a pas relevé des associations entre la reprise de poids et la cognition.

Dans une méta-analyse sur des études publiées entre 1960 et 2016, chez les jeunes obèses de moins de 21 ans sans comorbidités médicales, Pearce et al. (2018) ont exploré le lien entre l'IMC et le contrôle inhibiteur (CI). Les auteurs ont conclu que les jeunes garçons sont les moins vulnérables aux effets négatifs de l'obésité sur la performance du CI (voir aussi Nederkoorn et al., 2006). Malgré l'absence de résultats significatifs pour l'inhibition de l'interférence, e.g. le Stroop, l'obésité influence le CI dans les tâches d'inhibition de la réponse, i.e. Stop Signal et Go/noGo. D'autres variables, comme le QI et le statut socioéconomique, n'ont pas modéré les effets rapportés. Des résultats en faveur de ce lien ont été également signalés dans les recherches sur l'impulsivité, le CI et l'IMC, sachant que l'impulsivité est un construit complexe relevant du CI, comme l'indiquent Logan et al. (1997) dans une étude princeps évoquée en Introduction. Par exemple, Jasinska et al. (2012) ont démontré que l'impulsivité et les déficits de CI sont positivement associés à plusieurs aspects d'une alimentation malsaine, comme la suralimentation, ce qui contribue à un IMC élevé. Dans une méta-analyse portant sur l'impulsivité chez les individus obèses de 2 à 21 ans, Thamocharan et al. (2013) ont conclu que les jeunes en surpoids et obèses sont plus impulsifs que ceux de corpulence normale. Toutefois, l'accent est mis sur le type de mesure utilisée, les tâches comportementales exprimant des effets plus marqués que les données auto-déclarées. Bien que les conclusions générales penchent en faveur d'un lien entre l'IMC et les compétences d'inhibition, ces résultats nuancés renforcent le besoin d'ajouter des modérateurs à cette relation, tel que le sexe et les troubles de l'humeur (Fitzpatrick et al., 2013). Effectivement, comme les différences entre les sexes sont capitales à la fois dans l'IMC et les hormones pendant l'adolescence, l'influence de ces variables sur la cognition doit être examinée en fonction du sexe (Karlsson et al., 2021).

Le poids corporel étant associé à l'IMC, on peut s'attendre à ce que l'IMC soit aussi corrélé avec le taux de glycémie. Or, cette relation n'est pas unanime dans la littérature. Agrawal et al. (2017) évoquent à la fois l'absence de corrélations statistiques significatives entre le taux de glycémie aléatoire et l'IMC chez les adultes, tout en signalant la concomitance entre le taux de glycémie à jeun et l'IMC. Les auteurs indiquent également que, chez certaines populations, comme en Inde, ce lien peut être retrouvé de manière plus fréquente. Il y aurait donc une influence génétique et du mode de vie culturellement ancré (e.g. Innocent et al., 2013) sur les résultats observés. En outre, les corrélations entre ces deux variables semblent être plus fréquentes chez les populations cliniques, comme pour les personnes âgées avec un

microbiote intestinal défaillant (Sepp et al., 2014). Il convient d'ajouter que les personnes obèses et/ou éprouvant une résistance à l'insuline présentent souvent des altérations du métabolisme cérébral du glucose à jeun (Rebelos et al., 2021).

Considérant les arguments présentés ci-dessus, notre étude vise à explorer (1) le lien entre le taux aléatoire de glycémie sanguine, l'IMC et les performances de base du CI, i.e. sans intervention expérimentale. Nous nous interrogeons également (2) si la pratique du CI – par voie directe (l'entraînement cognitif, EC) et indirecte (la pratique de méditation de pleine conscience, PC) – peut changer la relation entre le glucose sanguin, l'IMC et les performances d'inhibition, en comparaison à un groupe ayant suivi un entraînement de contrôle actif (CA). Notre objectif est donc de comparer ce lien dans deux situations, avant et après intervention cognitive. Conformément à la littérature, dans un premier temps, nous nous attendons à de meilleures performances inhibitrices de base pour des taux plus élevés de glucose en population normale (i.e. respectant les seuils non-cliniques). De même, un IMC élevé serait associé à une efficacité d'inhibition amoindrie, et cela de manière plus marquée pour les filles. Dans un second temps, nous faisons l'hypothèse d'un affaiblissement du lien entre le glucose sanguin et les capacités d'inhibition en raison de l'automatisation de ces capacités, i.e. la pratique du CI rendant les tâches plus faciles donc requérant moins d'apport glycémique pour leur exécution. Cela serait d'autant plus marqué pour l'intervention EC, qui exerce directement le CI. Finalement, nous nous attendons aussi à une absence de corrélation entre le taux de glucose aléatoire et l'IMC, étant donné la population typique sélectionnée pour cette étude. A notre connaissance, aucune étude à ce jour n'a évalué l'effet du glucose sanguin et de l'IMC sur la performance au CI, avant et après des interventions cognitives.



## **2.2. Méthode**

### **2.2.1. Participants**

Quatre-vingt-onze adolescents (16-17 ans,  $M=16.71 \pm 0.53$ , 55 filles) ont été recrutés dans des lycées parisiens pour le projet APEX, tel que détaillé précédemment. De même, les facteurs d'exclusion et d'inclusion ont suivi les critères établis dans ce projet.

### **2.2.2. Interventions**

Comme nous l'avons décrit précédemment, tous les entraînements (EC, PC et CA) ont été réalisés à raison de 15 minutes par jour, cinq jours par semaine pendant cinq semaines. Les entraînements ont été présentés en détail précédemment, en Introduction générale.

### **2.2.3. Evaluation du CI**

Dans cette étude, nous avons sélectionné deux tâches classiques d'inhibition, à savoir le Stroop cognitif et la tâche Stop Signal. Ce choix avait pour but d'examiner le CI selon deux construits distincts, proposés par Diamond (2013), i.e. la gestion de l'interférence, mesurée par le Stroop, et l'inhibition des réponses, par la tâche Stop Signal. Tous les participants ont d'abord effectué le Stroop et, par la suite, la tâche Stop Signal.

Pour le Stroop, le temps de réponse (TR) en secondes a été mesuré pour chaque essai entre l'apparition du stimulus et le moment où le participant a effectué sa réponse. Nous avons calculé les TR en millisecondes sur l'ensemble d'essais réussis pour chaque individu. Dans la condition incongruente, i.e. le mot et la couleur du mot correspondant à des couleurs distinctes, seuls les essais ayant une incongruence à la fois perceptive et motrice ont été considérés. Autrement dit, seuls les essais dont le bouton de réponse différait pour la cible et le distracteur ont été retenus. L'incongruence perceptive, uniquement, renvoie à des boutons

identiques pour la cible et le distracteur, ce qui rend impossible l'identification de bonnes réponses reflétant l'inhibition de l'automatisme de la lecture.

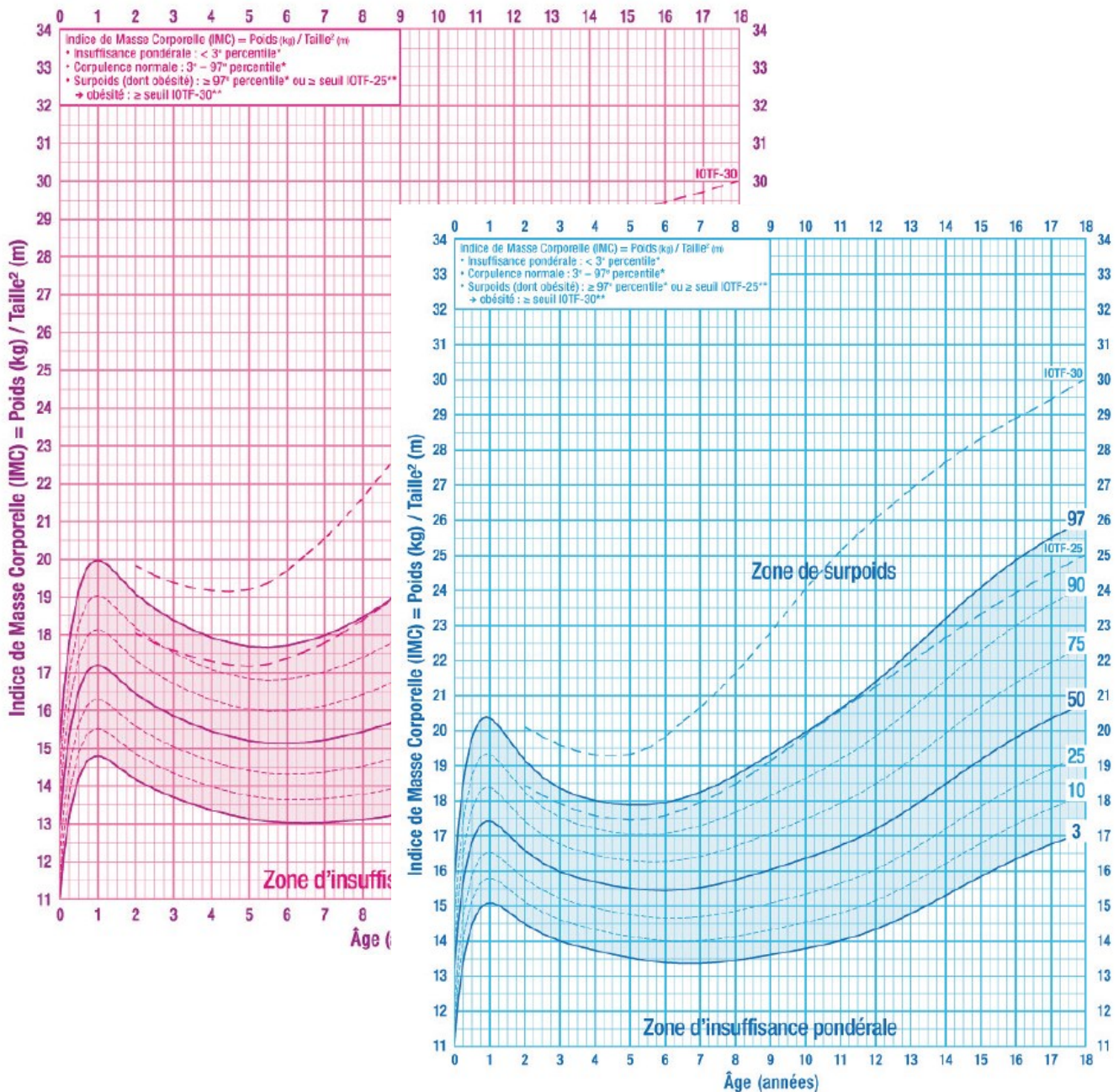
Pour la tâche Stop Signal, la performance du CI a été relevée selon le temps de réaction à la tâche (SSRT), tel que le recommande la littérature (Verbruggen et al., 2019). Précisément, le SSRT est la valeur réelle qui tient compte du délai d'apparition du signal dû aux limitations du logiciel.

#### **2.2.4. Evaluation physiologique**

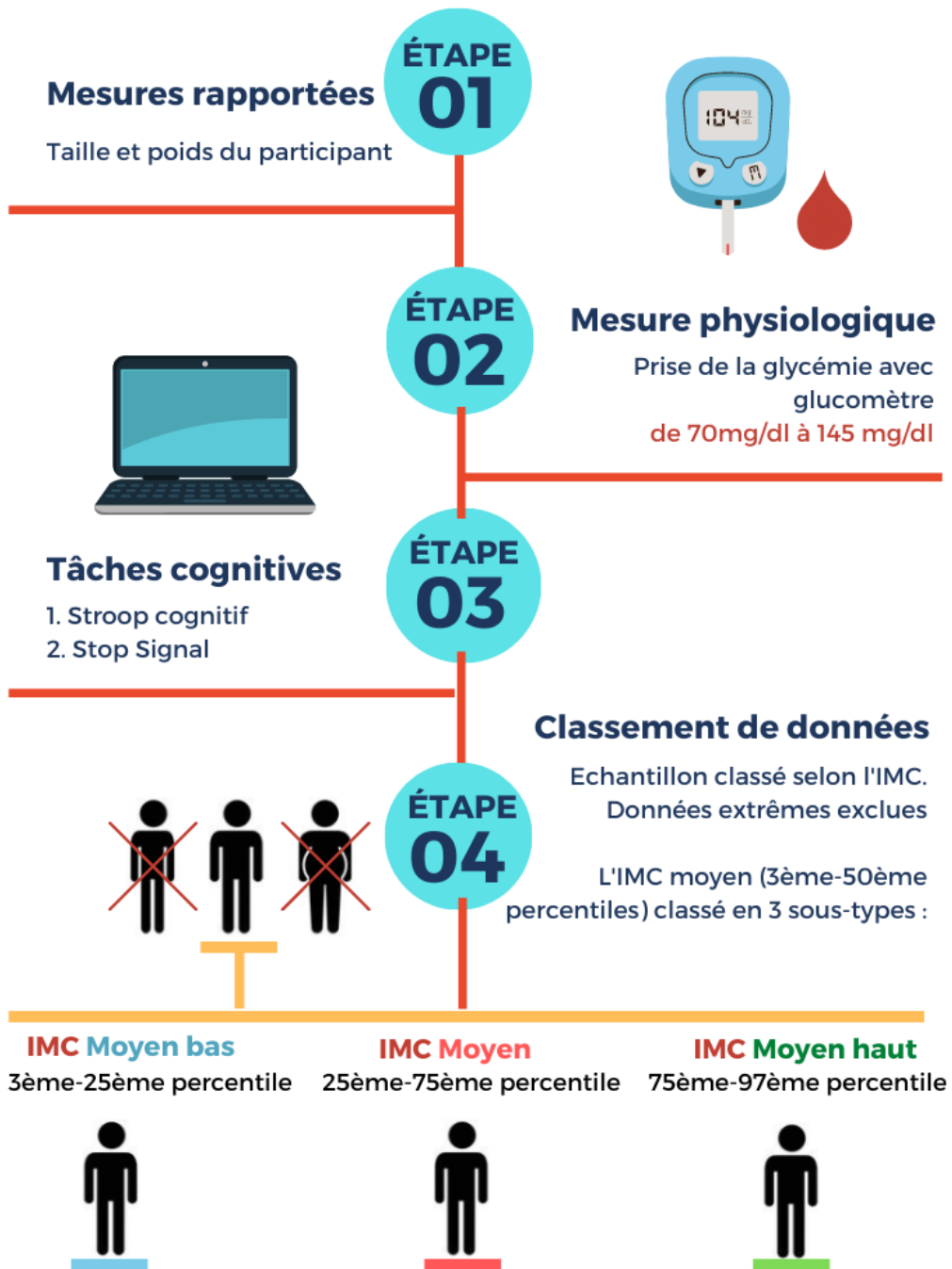
En accord avec les standards des taux de glycémie sanguine (e.g. Chase, 2002), tous participants avaient des valeurs entre 70mg/dl et 145 mg/dl, donc en deçà du seuil normal pour cet âge (<150mg/dl). Les taux de glucose ont été recueillis par le biais d'un glucomètre numérique (Accu-Chek Performa) avant le début de la batterie de tests cognitifs au moment T0, qui précède les interventions, et similairement à T1, après les interventions. Ce taux de glucose est dit « aléatoire » car il n'implique pas l'imposition du jeûne ou quelque manipulation expérimentale afin de recueillir le maximum de variabilité normale retrouvée pour cette population.

L'IMC a été calculé selon les standards préconisés par l'Organisation Mondiale de Santé (OMS) pour les individus de 5 à 19 ans (Andersen et al., 2018; Anderson et al., 2019; WHO, 2011) à partir du poids et de la taille autodéclarés. Précisément, la corpulence a été obtenue en divisant le poids par la taille au carré. Conformément à la littérature dans ce domaine (e.g. Fields et al., 2013; Pearce et al., 2018; Thamocharan et al., 2013), chaque individu a été classé à posteriori en prenant en compte l'âge et le sexe sur une courbe de corpulence en percentile selon les standards internationaux, à savoir : l'insuffisance pondérale pour un IMC inférieur au troisième percentile ; la corpulence normale couvrant les taux situés entre le troisième et le 97ème percentile ; finalement, le surpoids, dont l'obésité, pour les IMC supérieurs ou égaux au 97ème percentile (Figure 1). Quatre participants situés dans les extrêmes cités ont été retirés de l'étude afin de garder un public typique. Afin de mieux rendre compte des variations subtiles de performance au sein de notre échantillon dit « normal », nous avons créé des catégories en fonction des percentiles à partir de la moyenne, i.e. le percentile moyen

(50ème). Ainsi la moyenne basse se trouve entre le troisième percentile et le 25ème percentile ; le IMC moyen étant fixé entre le 25ème percentile et le 75ème percentile, alors que la moyenne haute couvre les scores entre le 75ème percentile jusqu'au 97ème percentile. Ces informations sont résumées dans la Figure 2.



**Figure 1.** Exemple de classification de l'IMC pour enfants et adolescents pour chaque sexe selon des courbes de corpulence (H.A.S, 2011)



**Figure 2.** Résumé du recueil de données et de la classification de l'IMC en pré-test

### 2.2.5. Analyses statistiques

Des régressions linéaires multiples ont été effectuées avec les taux de glycémie sanguine pour prédire la performance aux tâches de CI en prenant en compte l'âge, le sexe et l'IMC. Les participants ont été divisés en 3 sous-groupes selon la courbe de corpulence de l'IMC, à savoir (a) 'moyenne basse' pour la fourchette entre le troisième et le 25<sup>ème</sup> percentiles ; (b) 'moyenne', pour les personnes se situant entre le 25<sup>ème</sup> et le 75<sup>ème</sup> percentiles, et (c) 'moyenne haute' couvrant les scores entre le 75<sup>ème</sup> et le 97<sup>ème</sup> percentiles. Les effets principaux et les interactions dans le modèle linéaire ont été estimés avec des tests *F*. Une valeur *p* (*two-tailed*), inférieure à 5% a été considérée statistiquement significative.

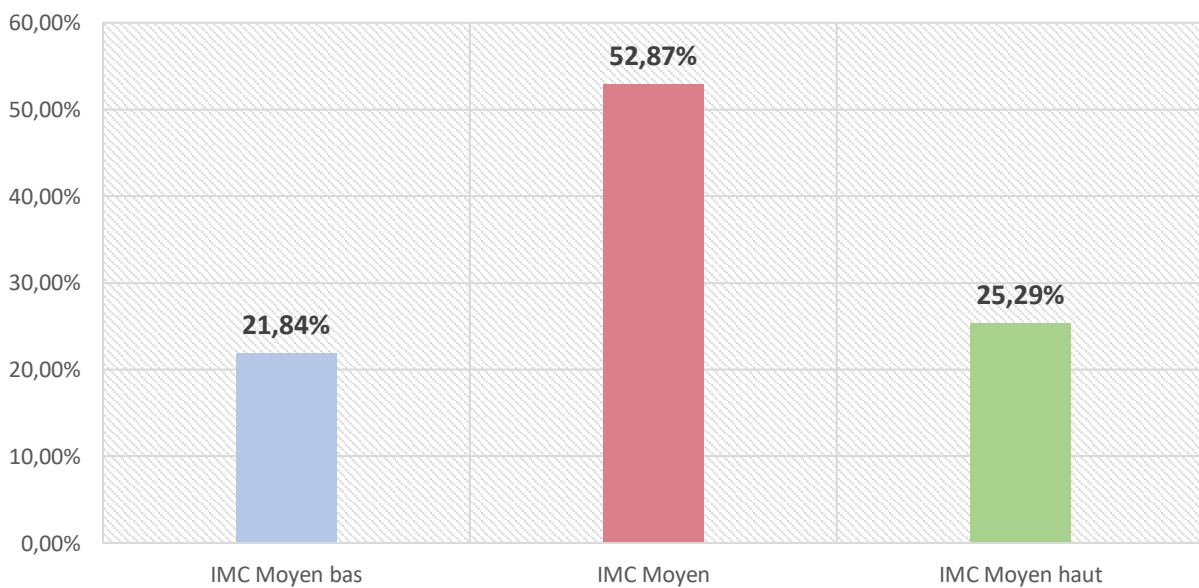
Les analyses ont été réalisées avec le logiciel R 4.1.0 (<http://www.r-project.org/>) et les packages "tidyverse", "car" et « emmeans », ont été appliqués pour le traitement des données et pour les régressions linéaires. Les tests post-hoc ont été effectués avec la correction de Tukey. Les résultats significatifs et tendanciels des analyses post-hocs ont été rapportés.

## 2.3. Résultats

En raison d'erreurs du glucomètre, nous n'avons pas pu relever le taux de glycémie de treize participants en pré-test, dont cinq filles. La distribution des courbes de corpulence et de glycémie en pré-test est présentée ci-dessous (Figure 3). Les taux de glucose ne différaient pas significativement en fonction de l'IMC,  $F(2, 71) = 2.28, p = 0.11$  (Tableau 1).

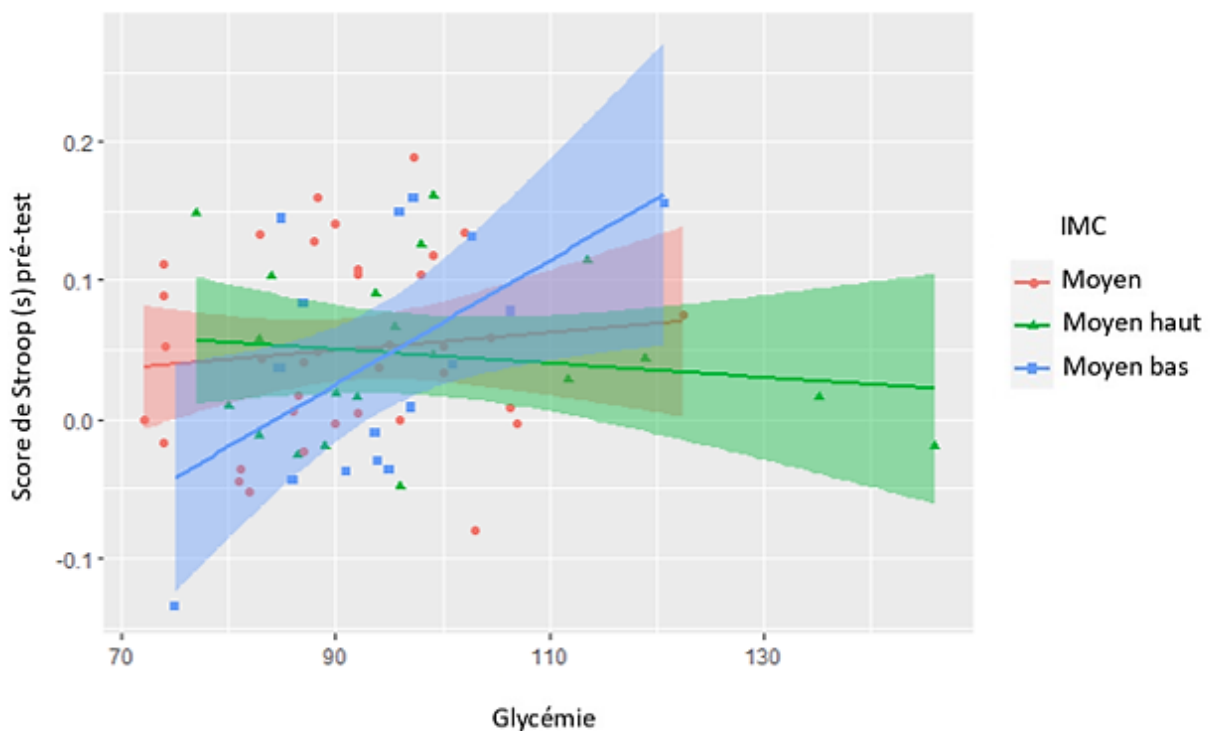
**Tableau 1.** Les moyennes des taux de glycémie en fonction du sexe et des courbes de corpulence chez les adolescents

Courbe IMC	Glycémie en pré-test			p-values
	Moyen bas	Moyen	Moyen haut	
<b>N valides/manquantes</b>	17/2	37/9	20/2	Ns
<b>Moyenne ± écart-type</b>	93.97 ±10.45	90.75 ± 10.99	98.56 ± 18.21	ns
<b>Minimum/Maximum</b>	75.00/120.73	72.10/122.54	77.00/145.96	
<b>Sexe (F/M)</b>	9/10	29/17	13/9	ns



**Figure 3.** Distribution des courbes de corpulence des participants en pré-test

La régression multiple sur les niveaux de base du Stroop cognitif a révélé une interaction significative entre les taux de glycémie et l'IMC,  $F(2, 60) = 3.75, p < .05, \eta^2p = .11$ . Les analyses post-hoc ont indiqué uniquement un effet significatif de la glycémie pour l'IMC moyen bas ( $M = 0.05 \pm 0.08$ ) sur les scores de Stroop,  $t(60) = 2.16, p < .05$ . Chez ces personnes ayant un IMC moyen bas, plus le taux de glycémie est élevé, moins efficace est le CI à la tâche de Stroop (Figure 4). La glycémie n'a pas d'effet significatif pour les individus situés sur les autres courbes de corpulence sur le score de Stroop. En outre, les analyses post-hoc ont indiqué une différence significative des performances au Stroop cognitif chez les individus ayant un IMC moyen bas ( $M = 0.05 \pm 0.08$ ) en comparaison à ceux présentant un IMC moyen haut ( $M = 0.06 \pm 0.08$ ),  $t(60) = -2.36, p = .05$ . Ainsi, les participants classés sur la courbe d'IMC moyen bas présentent des scores plus faibles au Stroop Cognitif avec la glycémie élevée, différant des individus sur la moyenne haute de l'IMC, pour qui la performance est meilleure avec l'augmentation du glucose. Les autres effets, comme les valeurs de base de la glycémie sur les courbes de l'IMC et l'interaction avec le sexe, étaient non significatifs ( $p > 1.0$ ).

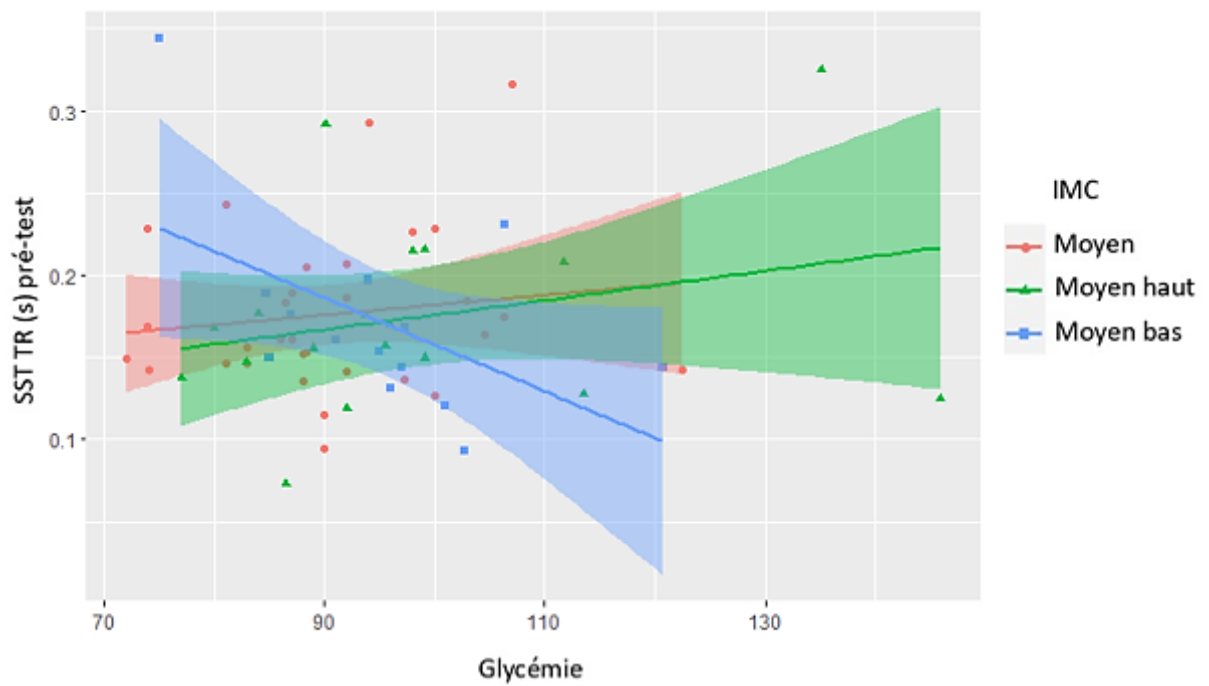


**Figure 4.** Variations de performance au Stroop selon le glucose et les courbes de corpulence des participants en pré-test.

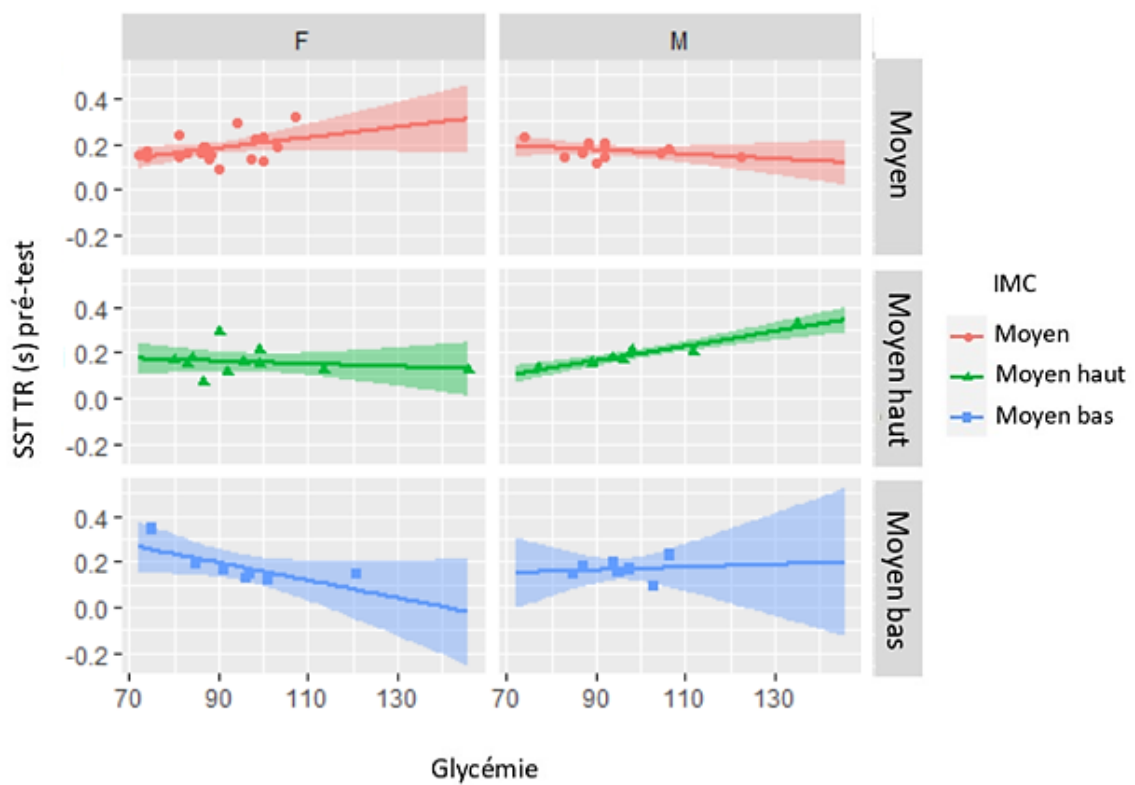
Les analyses sur les niveaux de base de la tâche Stop Signal ont également présenté une interaction significative entre le taux de glycémie et les courbes de corpulence de l'IMC,  $F(2, 50) = 3.21, p < .05, \eta^2p = .11$ . Les post-hocs ont décelé uniquement un effet tendanciel de la glycémie sur le SSRT chez les participants ayant un IMC moyen haut,  $t(50) = 1.79, p = 0.08$ , signalant une performance tendanciellement plus faible pour des taux élevés de glycémie (Figure 5).

Nous avons également relevé une interaction significative entre le glucose, le sexe et les courbes de corpulence de l'IMC sur la performance à la SST,  $F(2, 50) = 6.10, p < .01, \eta^2p = .20$  (Figure 6). Les analyses post-hoc de cette interaction ont indiqué un effet significatif de la glycémie sur le SSRT pour les garçons situés sur la courbe moyenne haute de l'IMC ( $M = 0.22 \pm 0.08$ ),  $t(50) = 2.72, p < .01$ , les taux élevés de glycémie correspondant à des performances affaiblies. Un pattern similaire est retrouvé chez les filles ayant un IMC moyen ( $M = 0.17 \pm 0.05$ ),  $t(50) = 2.14, p < .05$ , la glycémie plus élevée étant associée à une dégradation du SSRT. Nous avons également relevé un effet significatif de la glycémie sur le SSRT pour les filles ayant un IMC moyen bas ( $M = 0.18 \pm 0.07$ ),  $t(50) = -2.71, p < .01$ , les taux élevés de la glycémie étant cette fois-ci associés à une performance plus efficace. En outre, il existe une différence significative entre les performances des filles ayant un IMC moyen bas ( $M = 0.18 \pm 0.07$ ) en comparaison à celles présentant un IMC moyen ( $M = 0.17 \pm 0.05$ ),  $t(50) = 3.46, p < .05, \eta^2 = .10$ . Précisément, les filles possédant un IMC moyen bas sont plus efficaces pour des taux plus élevés de glycémie, alors que les adolescentes ayant un IMC moyen présentent une performance amoindrie pour les taux de glucose plus hauts.





**Figure 5.** Variations de SSRT selon le glucose et les courbes de corpulence des participants en pré-test



**Figure 6.** Variations de SSRT en pré-test selon le glucose et les courbes de corpulence pour chaque genre

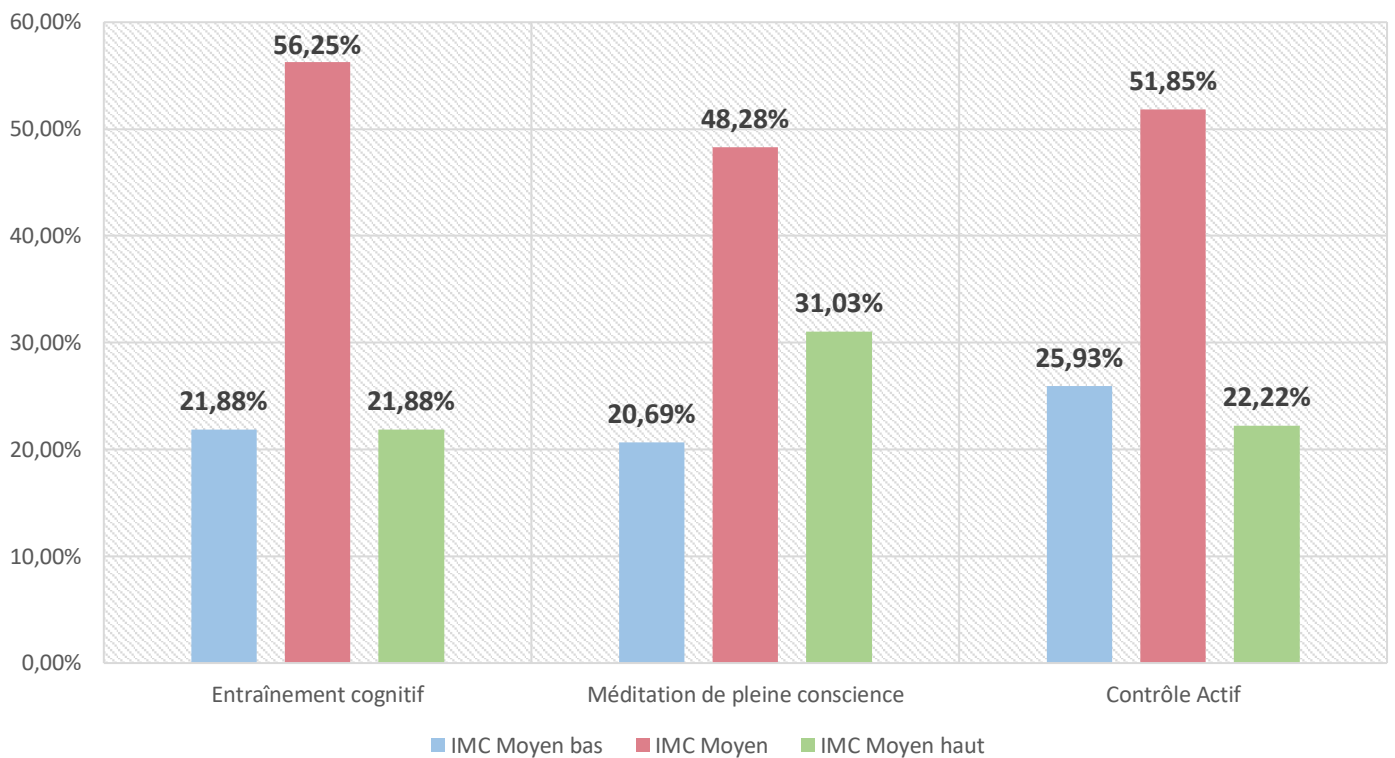
En posttest, nous n'avons pas pu relever le taux de glycémie pour neuf participants, dont deux filles. De plus, aucun changement important de poids et de taille n'a été rapporté par les participants à T1. Afin de s'assurer que les résultats obtenus à T0 n'étaient pas dépendants d'une différence préexistante entre les individus qui ont composé les groupes d'intervention par la suite, nous avons vérifié l'effet des groupes d'intervention dans le modèle appliqué en pré-test. Aucune interaction significative n'a été relevée avec les groupes d'intervention à T0. De plus, aucune différence significative de glycémie n'a été relevée en fonction des groupes d'intervention en posttest (Tableau 2 et 3). La distribution des courbes de corpulence a été représentée sur la Figure 7.

**Tableau 2.** Les moyennes des taux de glycémie en fonction du sexe et des courbes de corpulence chez les adolescents en posttest

Courbe IMC	Glycémie en posttest			p-values
	Moyen bas	Moyen	Moyen haut	
<b>N valides/manquantes</b>	18/1	39/7	21/1	ns
<b>Moyenne ± écart-type</b>	96.95 ±10.05	94.40 ± 13.94	90.14 ± 12.22	ns
<b>Minimum/Maximum</b>	86.50/114.00	76.00/131.55	75.68/118.93	
<b>Sexe (F/M)</b>	9/10	29/17	13/9	ns

**Tableau 3.** Taux de glycémie aléatoire selon les courbes de corpulence pour chaque sexe

	IMC Moyen-bas		IMC Moyen		IMC Moyen-haut	
	F	M	F	M	F	M
<b>Pré-test</b>	95.1 ± 14.3	93.2 ± 7.5	89.3 ± 9.7	93.1 ± 12.9	96.0 ± 18.4	102.4 ± 18.5
<b>Posttest</b>	98.3 ±10.5	96.0 ± 10.1	97.2 ±15.8	89.9 ± 9.0	90.3 ±13.5	90.0 ± 10.7

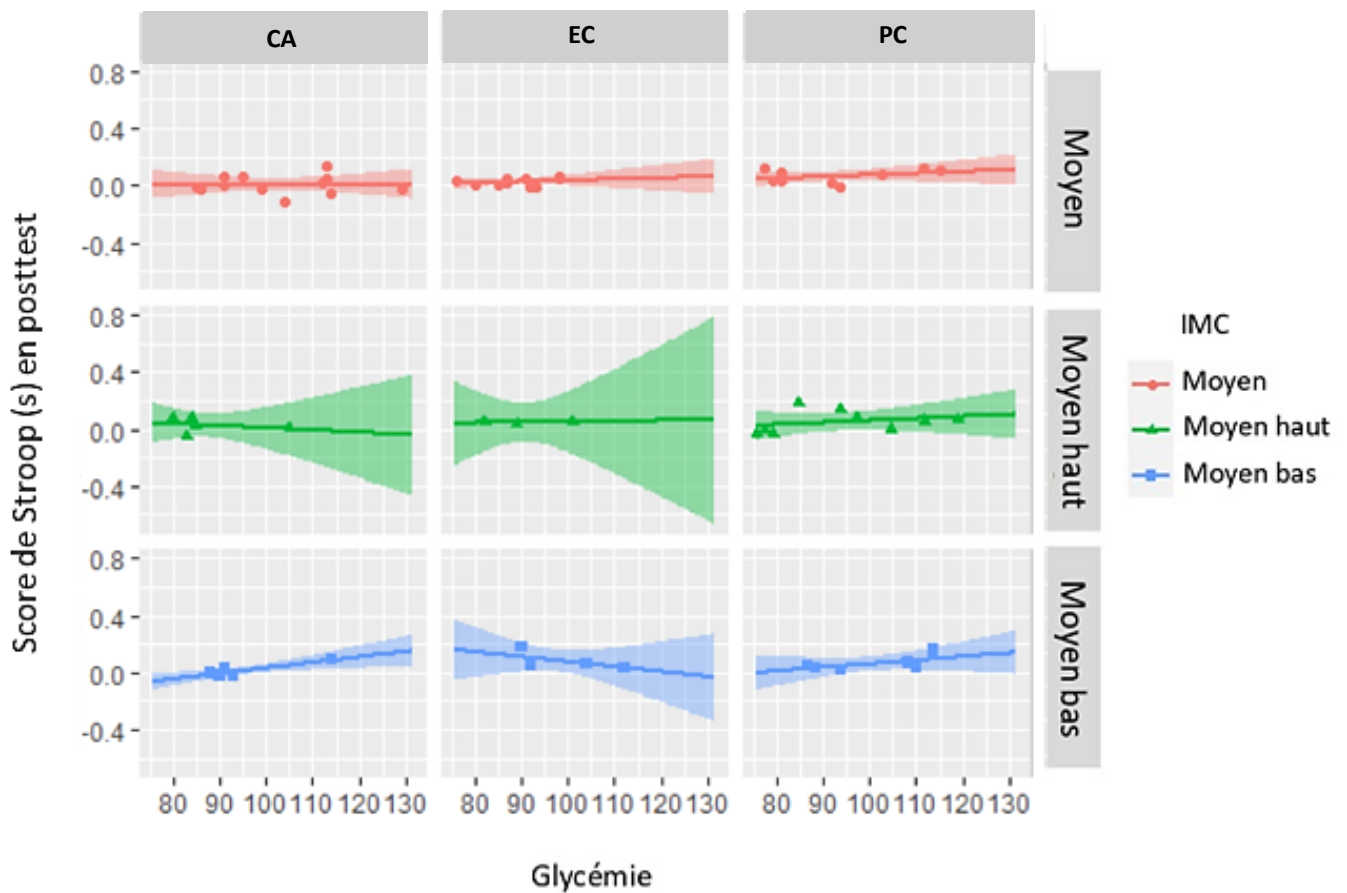


**Figure 7.** Distribution des courbes de corpulence au sein de chaque groupe d'entraînement

Afin d'explorer si les liens observés précédemment pour la glycémie, l'IMC et le sexe sur les performances du CI ont changé après les interventions cognitives, nous avons testé ces effets dans une régression linéaire en ajoutant les groupes d'intervention.

Pour le Stroop, nous avons relevé une interaction significative entre la glycémie en posttest et les groupes d'intervention,  $F(2, 38) = 4.56, p < .05, \eta^2p = .19$ . Les post-hocs n'ont pas révélé des résultats significatifs.

Pour la tâche Stop Signal, aucun effet significatif n'a été observé à T1 ( $ps > 1.0$ ).



**Figure 8.** Variations au score de Stroop selon le glucose et les courbes de corpulence au sein de chaque groupe d'entraînement au posttest

## 2.4. Discussion

Cette étude avait pour but d'évaluer l'influence du taux de glycémie sanguine et de l'IMC sur les performances d'inhibition avant et après deux interventions cognitives entraînant le CI – l'une par voie directe, l'autre exerçant le CI indirectement à travers la méditation de pleine conscience – et ce, en comparaison à un groupe de contrôle actif.

Les résultats sur le niveau de base indiquent l'influence de la glycémie et de l'IMC à la fois sur le score de Stroop cognitif et de la tâche Stop Signal. Précisément, nous avons pu observer un effet de la glycémie et des courbes de corpulence de l'IMC sur les scores de base du Stroop cognitif. Ce résultat est important chez les personnes ayant un IMC moyen bas pour qui un taux de glycémie élevé est associé à des compétences d'inhibition moins efficaces sur le Stroop. Nous avons également observé un effet de la glycémie et de l'IMC sur la performance à la tâche Stop Signal.

Contrairement à notre première hypothèse, les taux élevés de glycémie sanguine n'impliquent pas nécessairement une amélioration des performances de CI. De plus, cela semble dépendre non seulement de la tâche en question, mais également de la courbe d'IMC. Parallèlement, lien inattendu entre la glycémie et l'IMC chez une jeune population non-clinique suggère une dynamique plus complexe reliant ces facteurs durant l'adolescence, comme nous l'avons évoqué auparavant (Gunstad et al., 2008).

Nous nous penchons d'abord sur l'influence du taux de glucose, à la fois sur le Stroop et la tâche Stop Signal, chez les personnes se situant sur la moyenne basse de l'IMC (entre le troisième et le 25<sup>ème</sup> percentile). Comme nous l'avons précédemment souligné, cette influence s'exprime de manière opposée dans cet échantillon pour chacune des tâches, caractérisée par des performances plus faibles de Stroop, i.e. l'inhibition cognitive, associées à des taux plus élevés de glucose. Inversement, la glycémie élevée est tendanciellement associée à un SSRT plus performant, i.e. l'inhibition de la réponse.

Afin de comprendre ce résultat, nous soulevons un point qui peut être déterminant pour expliquer une telle disparité, à savoir le rôle du stress aigu. Tout d'abord, il est capital de souligner que les faibles réserves de sucre dans le sang, i.e. l'hypoglycémie, représentent une source de stress qui entraîne l'activation de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien et du système sympatho-adrénalien (Gibbons et al., 2012). Cette activation correspond à la réaction physiologique face à un stress ponctuel (stress aigu), en particulier une élévation de cortisol dans le sang. L'augmentation de cette hormone affecte négativement la régulation de la glycémie sanguine et stimule la fabrication de glucose par le foie (Dias et al., 2020), influençant également la cognition (Shields et al., 2015). Dans une méta-analyse sur l'impact de l'administration de cortisol sur les fonctions exécutives, il a été révélé que ces effets rapides du cortisol améliorent l'inhibition (Shields et al., 2015). Néanmoins, le stress sur le CI semble être spécifique aux compétences inhibitrices requises, i.e. le stress améliore l'inhibition de la

réponse, mais dégrade l'inhibition cognitive (Shields et al., 2016). Cela est précisément ce que l'on observe pour le Stroop et la tâche Stop Signal, i.e. l'inhibition cognitive et l'inhibition de la réponse, respectivement. Il est globalement connu que les adolescents sont particulièrement sensibles aux sources de stress, en raison des changements physiologiques, cognitifs et sociaux en cours durant cette période (Roy et al., 2021). Par ailleurs, la réalisation de tâches cognitives présente un potentiel stressant important (Khalili-Mahani et al., 2020), principalement la tâche Stop Signal (Friehs et al., 2020) dont l'algorithme assure que la réussite ne soit pas totale. Il est donc envisageable que la réalisation de cette tâche ait majoré les effets du stress à même d'influencer la performance exécutive.

C'est la spécificité de ces résultats chez les personnes ayant un IMC moyen bas qui suscite des interrogations. Premièrement, il est possible ces individus présentent un stock plus bas de glucose que les autres participants. Par exemple, dans une étude sur des patients diabétiques type 2, les personnes ayant un IMC inférieur présentaient des réserves de glucose sensiblement réduites en comparaison à leurs homologues ayant un IMC supérieur (Cheng et al., 2018). Deuxièmement, il est possible que les adolescents sur cette courbe de corpulence soient plus sensibles aux variations de glycémie, répondant de manière plus intense au pic glycémique. Cela a été également mis en exergue dans l'étude de Wang et al. (2017), bien que celle-ci s'adresse à une population de diabétiques adultes. Cette variabilité considère les mesures sur la direction, l'ampleur, la durée, la fréquence et les causes des fluctuations du glucose. Les auteurs ont constaté que les patients en dessous du poids optimal ou de poids normal présentent des pics de glucose post prandial plus élevés que les patients en surpoids ou obèses, ce qui tend en faveur d'une sensibilité accrue à l'augmentation glycémique possiblement induite par le stress. Dans cette optique, les personnes se situant sur la courbe moyenne basse de l'IMC seraient soumises à des effets plus marqués du glucose sur la cognition.

En outre, notre étude a mis en avant une relation significative entre le glucose, les courbes de corpulence de l'IMC et le sexe sur le SSRT. En détail, seulement les filles ayant un IMC moyen bas bénéficient des taux élevés de glycémie pour la tâche Stop Signal. Cela rejoint en partie notre hypothèse concernant l'influence positive des taux de glucose élevés pour la cognition, ainsi que des meilleures performances pour la courbe moyenne basse de l'IMC, notamment pour les filles. Le lien entre le CI et l'IMC chez les filles adolescentes est cohérent avec l'étude de Batterink et al. (2010), qui ont exploré la relation entre les activations

neuronales en IRM durant un Go/noGo spécifique à la nourriture chez les filles de 16 ans en moyenne et l'IMC. Précisément, pour chaque essai, l'image d'un légume (essai « go », 75% des occurrences) ou l'image d'un dessert (essai « noGo », 25% des occurrences) était présentée pendant 500 ms. Les résultats ont signalé que l'IMC est associé à l'inhibition de la réponse, tant au niveau comportemental que neuronal. En détail, les adolescentes exhibant un IMC élevé ont présenté plus d'erreurs de commission et des activations réduites des régions connues pour sous-tendre les processus d'inhibition, tel que le cortex préfrontal ventrolatéral. De concert avec cet argument, l'interaction entre l'IMC moyen haut et la glycémie dans notre étude indique un SSRT moins efficace pour les garçons situés cette courbe.

Les garçons d'IMC moyen haut et les filles d'IMC moyen présentent une association négative entre le glucose sanguin et le SSRT. Ainsi, plus haut est le taux glycémique, plus faible est la performance à la tâche. Il est intéressant de noter que peu d'études indiquent une relation négative entre la glycémie et la performance exécutive chez les personnes typiques (Liu et al., 2020). Ce résultat fait donc émerger le besoin de mieux explorer le lien complexe entre le glucose et le CI, e.g. étudier la régulation glycémique plutôt que la glycémie aléatoire. Autrement dit, il peut être plus sensible d'examiner les variations de la glycémie au cours d'une période au lieu d'analyser un échantillon ponctuel de glucose sans contrôle préalable, e.g. le jeûne. Dans notre étude, la glycémie a été mesurée juste avant la tâche de Stroop, celle-ci précédant la tâche Stop Signal ; il est donc possible que certains participants, par des spécificités liées à l'âge, au sexe, à la disponibilité de sucre stocké (Flint & Turek, 2003) et le stress potentiel, soient affectés par une absorption initiale accélérée de glucose suivie d'un défaut de disponibilité par la suite, ce qui causerait une dégradation de la performance cognitive dans un second temps. Par ailleurs, étant donné la variabilité de régulation glycémique déjà rapportée pour les courbes basses de l'IMC, soit dans la pathologie (Wang et al., 2017), soit chez les adultes typiques (Jauch-Chara et al., 2011), les personnes ayant un IMC plus bas pourraient être moins impactées par l'absorption initiale de glucose. Agissant telle une photographie instantanée de l'état glycémique, le taux aléatoire de glucose ne nous fournit pas suffisamment d'éléments pour expliquer les spécificités des résultats observés.

En posttest, en ce qui concerne la tâche Stop Signal, l'absence d'effet peut aussi témoigner de la baisse du stress associé au retest et la diminution du coût cognitif perçu, ce qui renforcerait les hypothèses sur le stress évoquées pour les résultats à T0. De plus, l'interaction entre la glycémie et les groupes d'intervention sur le score de Stroop indique que l'effet de la glycémie diffère selon l'entraînement cognitif suivi. Or, la comparaison post-hoc entre les groupes n'est pas significative. D'une part, il est possible que le test de correction de Tukey soit trop conservateur car il tente de contrôler le niveau alpha global lors des comparaisons multiples (Cohen, 2013). D'autre part, il est envisageable que ce résultat indique que les entraînements cognitifs interagissent différemment avec la glycémie sur les scores de Stroop, mais de manière non significative. Cela peut être dû notamment aux échantillons de petite taille qui composent les sous-groupes d'IMC.

Notre étude présente certaines limites. Comme nous l'avons déjà évoqué, le taux aléatoire du glucose sanguin ne rend pas compte des spécificités de la dynamique entre la glycémie, l'IMC et les scores cognitifs. Nous nous sommes cependant assurés que les taux recueillis respectent de seuil typique pour le glucose aléatoire dans cette tranche d'âge (<150 mg/dl), et nous avons vérifié l'absence des différences glycémiques préexistantes entre les courbes de corpulence, les sexes et les groupes d'intervention. De plus, considérant le nombre de données manquantes, notre échantillon sur chaque courbe de corpulence est très réduit (souvent moins de 15 personnes), ce qui peut compromettre la puissance de tests effectués, d'autant plus que la variance interindividuelle au sein de chaque groupe est élevée.

Il serait donc avantageux d'explorer la relation entre la glycémie sanguine, l'IMC et la cognition selon une perspective transversale séquentielle, accompagnant le taux glycémique avant le début et à la fin des tests cognitifs chez les individus situés sur plusieurs courbes de corpulence, et cela avant et après les entraînements proposés. Pour mieux creuser l'hypothèse sur le stress ainsi que le postulat indiquant l'absorption de sucre selon la complexité perçue des tâches, il serait intéressant de réaliser un contrôle glycémique, tel que l'imposition du jeûne pour huit heures, avec l'ajout d'une boisson glucosée avant le début des expérimentations. Evaluer des adolescents sur ces propositions, et plus généralement des mineurs, i.e. une population vulnérable, ne constituait pas un choix praticable d'un point de vue éthique pour une telle étude.



Des perspectives d'études émergent aussi des facteurs chronobiologiques, i.e. le nombre exact d'heures de sommeil, l'heure précise du dernier repas et la composition de ce repas, etc. A noter que notre étude a adressé ces questions à l'ensemble de sujets, mais les nombreuses données manquantes ont contraint les analyses, provenant notamment de l'incertitude des réponses ou de l'oubli du participant. Or, ces mesures peuvent jouer un rôle important dans les oscillations cognitives (Feldman & Barshi, 2007; Nabb & Benton, 2006). Par ailleurs, le cycle veille/sommeil et le contrôle homéostatique peuvent induire des altérations de l'autorégulation et des compétences exécutives (Owens et al., 2016). En outre, il est connu que les cycles circadiens influencent la régulation hormonale et comportementale quotidienne et qu'ils changent avec la puberté (Challamel & Franco, 2018). Plus précisément, les enfants présentent généralement un cycle orienté vers le matin, tandis que les adolescents sont davantage orientés vers le soir (Challamel & Franco, 2018; Roeser et al., 2012). Ces schémas affectent non seulement la routine veille-sommeil mais aussi le fonctionnement endocrinien, qui interagit avec le moment des repas. Cela peut induire une relation importante entre la chronobiologie, les habitudes alimentaires et la cognition (Ruiz-Gayo & Olmo, s. d.). En effet, la préférence des adolescents pour le soir peut affecter négativement les habiletés cognitives générales, comme celles requises dans le cadre scolaire (Adan et al., 2010, 2012) et la capacité à gérer l'impulsivité (Adan et al., 2010), celle-ci pouvant témoigner d'un CI peu performant.

Au-delà des tests cognitifs sur le CI, il serait intéressant d'explorer la dynamique entre le glucose, l'IMC et la pleine conscience sur plusieurs points de vue, à l'instar des recherches sur le sujet (Armani Kian et al., 2018; Camilleri et al., 2015; Loucks et al., 2016). Par exemple, dans le cadre de l'étude française NutriNet-Santé, Camilleri et al. (2015) ont examiné chez une large cohorte d'individus typiques l'association entre le statut pondéral et la pleine conscience trait, i.e. une prédisposition à porter toute son attention sur le moment présent de façon ouverte et sans jugement (Tang, 2017b), à travers l'échelle Five Facets Mindfulness Questionnaire (FFMQ). En ajustant les analyses aux facteurs sociodémographiques, les auteurs ont souligné une association négative entre la pleine conscience trait et le statut pondéral. Ainsi, plus la pleine conscience trait est marquée sur ces composantes, moins le poids est important. Des différences de genre ont également été rapportées, i.e. les femmes présentent une association négative sur toutes les sous-échelles du FFMQ, principalement celle sur l'observation, alors que seules deux sous-échelles, "observation" et "non-réactivité",

ont été négativement liées au statut pondéral chez les hommes. En détail, la sous-échelle d'observation mesure l'intérêt portée aux expériences individuelles internes et externes relatives aux cinq sens, aux pensées et aux émotions, pouvant jouer un rôle important dans la gestion émotionnelle et le stress (Lilja et al., 2013). Similairement, la sous-échelle « non-réactivité » fait écho à la gestion comportementale, indiquant l'absence de réactivité immédiate aux expériences vécues. La pleine conscience trait pourrait alors refléter des conduites plus prudentes et réfléchies dans l'alimentation, d'où le statut pondéral plus bas.

D'un autre point de vue, Armani Kian et al. (2018) ont évalué l'effet de huit semaines d'intervention de type Mindfulness Based Stress Reduction (MBSR) sur la régulation des émotions et le contrôle de la glycémie chez des patients adultes atteints de diabète de type 2. En comparaison au groupe témoin, le groupe d'intervention MBSR a présenté une réduction significative sur toutes les mesures, y compris les scores d'anxiété, de dépression et les mesures de glycémie, i.e. le glucose à jeun et l'hémoglobine glyquée, celle-ci permettant d'évaluer l'équilibre glycémique sur une plus longue période. Les auteurs expliquent ces résultats par l'effet de la méditation sur l'impulsivité alimentaire, associé à un régime plus conscient à l'écoute des besoins corporels. Cela va de pair avec les conclusions de l'étude précédente.

En conclusion, cette étude soutient l'effet de la glycémie sanguine et l'IMC sur l'efficacité du CI chez les adolescents, marqué par des changements à la suite d'interventions cognitives. Enfin, nos résultats ont souligné l'importance de prendre en considération les aspects physiologiques dans l'étude du fonctionnement et de la réceptivité à l'entraînement au CI. Compte tenu des limites exposées, nos résultats invitent à approfondir certains aspects de cette relation, notamment en ce qui concerne la dynamique complexe existante entre la régulation glycémique et les performances d'inhibition, ainsi que l'influence des facteurs chronobiologiques et de l'alimentation. Par ailleurs, des analyses évaluant le rôle de la pleine conscience trait et état sur le taux de glycémie et les scores de Stroop pourraient enrichir les conclusions de cette étude.

# 3

## Etude expérimentale

Les motifs sulcaux du cortex cingulaire antérieur contribuent à l'efficacité et à la réceptivité à l'apprentissage du CI chez les enfants : une étude longitudinale et développementale

*Nous nous intéressons dans cette étude aux contraintes neurodéveloppementales précoces, évaluées indirectement par les motifs sulcaux, à même d'influencer les performances de CI. Les résultats soulignent l'importance de prendre en compte la variabilité sulcale du CCA dans l'étude du fonctionnement et de la réceptivité à l'entraînement au CI.*

# **Etude 3 : Les motifs sulcaux du cortex cingulaire antérieur contribuent à l'efficacité et à l'apprentissage du CI chez les enfants : une étude longitudinale et développementale**

## **3.1. Introduction**

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un outil clef pour la recherche en psychologie, psychiatrie et neurosciences cognitives. L'IRM anatomique permet en effet d'évaluer des différences structurelles cérébrales et leurs associations avec les fonctions cognitives et les troubles psychiatriques dans la vie postnatale (Giedd & Rapoport, 2010). De nombreuses recherches se penchent actuellement sur le rôle des processus prénataux dans les performances cognitives générales, observables de l'enfance à l'âge adulte (Raznahan et al., 2012; Tissier et al., 2018). En effet, les caractéristiques anatomiques du cerveau dans la vie postnatale peuvent servir de proxy pour les événements fœtaux, telles que la typologie des sillons corticaux, i.e. les plis du cortex cérébral (Cachia et al., 2021b). Contrairement à des marqueurs quantitatifs du cortex, comme l'épaisseur et la surface, le pattern des sillons témoignent de la mise en place des plis primaires, secondaires et tertiaires au cours de la période périnatale, observables dès la naissance et demeurant relativement stables au cours du développement (Cachia et al., 2021; Tissier et al., 2018). Ces motifs sulcaux nous renseignent sur les contraintes fœtales imposées par des régions cérébrales spécifiques sur les capacités cognitives qui se manifestent au cours du développement (Cachia et al., 2021b).

Le Cortex Cingulaire Antérieur (CCA) constitue une région corticale pertinente pour l'étude sur l'association entre les motifs sulcaux et les capacités cognitives, en particulier exécutives. De manière générale, le CCA intervient dans plusieurs domaines cognitifs, comme le réseau attentionnel (e.g. Bush, 2011; Kondo et al., 2004; Posner et al., 2007) et le contrôle exécutif (Brockett et al., 2020; Cachia et al., 2021b; Fornito et al., 2004). Dans le cadre clinique, des spécificités du plissement du CCA jouent un rôle sur l'expression de certains symptômes, comme la cognition sociale dans cette pathologie (Fujiwara et al., 2007). Chez les individus typiques, les motifs sulcaux du CCA sont également associés à la capacité d'estimer si un

souvenir provient de la réalité ou de l'imagination (Buda et al., 2011) et au contrôle inhibiteur (CI). Le CI reçoit une attention particulière de par son importance dans le développement cognitif général (Diamond, 2013; Houdé, 2000, 2007), la réussite scolaire (Borst et al., 2015) et le succès professionnel (Moffitt et al., 2011). En effet, les patterns sulcaux du CCA semblent moduler l'efficacité de l'inhibition exercée (Borst et al., 2014; Cacia et al., 2014; Fornito et al., 2004; Huster et al., 2011; Tissier et al., 2018).

Le CCA exhibe deux patterns sulcaux qualitativement distincts qui se caractérisent soit par l'absence soit par la présence du sillon paracingulaire (SPC) au-dessus de la partie dorsale du sillon cingulaire. Le SPC est un sillon secondaire marquée par une variabilité intra et inter individuelle importantes chez l'humain (Paus et al., 1996). L'absence de ce sillon constitue le type dit « simple », alors que sa présence établit le type dit « double parallèle » (Ono et al., 1990). Déterminés entre 10 et 15 semaines de vie fœtale, chaque motif est présent chez 76% et 24% des adultes, respectivement (Chi et al., 1977). Ainsi, il est possible que les deux hémisphères possèdent le même pattern sulcal, i.e. motif dit « symétrique », ou des patterns différents, i.e. motif nommé « asymétrique ».

Les motifs sulcaux du CCA sont stables de la fin de l'enfance jusqu'à l'âge adulte, comme le démontrent Cacia et al. (2016) dans un suivi longitudinal allant de 7 à 32 ans. Par ailleurs, l'asymétrie du CCA s'associe à des compétences d'inhibition plus efficaces à la fois chez les adultes (Fornito et al., 2004), chez les enfants à l'âge de 5 ans (Cacia et al., 2014) et quatre ans plus tard (Borst et al., 2014). De même, chez les enfants de 10 ans et les jeunes adultes, l'asymétrie des sillons du CCA explique une partie de la variabilité cognitive observée à la tâche de CI (Tissier et al., 2018). Ces données suggèrent que les contraintes neurodéveloppementales précoces influencent la cognition ultérieure, mais cet effet n'est pas déterministe car il rend compte d'une partie et non de la totalité de la variabilité cognitive observée (Cacia et al., 2021b). Par ailleurs, il existe des différences de genre dans la fréquence d'apparition du SPC (Paus et al., 1996; Wei et al., 2017; Yücel et al., 2001). Le SPC dans l'hémisphère gauche, dit « asymétrie gauche », semble être plus commun chez les hommes adultes que chez les femmes (Wei et al., 2017; Yücel et al., 2001). Compte tenu de ces effets, il est important d'inclure le sexe dans les analyses sur la morphologie sulcale. Il convient aussi de noter que de nombreux facteurs environnementaux sont à même de moduler l'effet des motifs sulcaux sur la cognition, qu'il soit précoce comme la zigosité (Amiez 2018) ou plus tardif comme l'environnement bilingue (Cacia et al., 2017).

Nous nous questionnons dans cette étude sur le possible lien entre la méditation de pleine conscience et la morphologie sulcale. Il est connu que diverses régions du cerveau diffèrent entre méditants et témoins, soit en fonction de l'expérience méditative cumulée au cours de la vie, soit comme conséquence des exercices de méditation en tant qu'entraînement cognitif (Hölzel et al., 2008; Lazar et al., 2005; Tang et al., 2010). Luders et al. (2012) ont investigué le lien entre la méditation de pleine conscience et la gyrification, i.e. le degré de plissement du cortex, en comparant des adultes méditants expérimentés et un groupe contrôle. Les auteurs ont mis en évidence des corrélations positives entre la gyrification et le nombre d'années de méditation dans l'insula dorsale antérieure droite, une structure impliquée dans la régulation de distractions telles que la rêverie, le mind-wandering et les projections dans le passé ou le futur. Par ailleurs, l'insula antérieure droite participe également aux processus d'inhibition (Cai et al., 2014). Bien que la méditation ait déjà fait l'objet d'études sur les caractéristiques quantitatives du cerveau, aucune étude à ce jour, à notre connaissance, n'a évalué le rôle des caractéristiques qualitatives du cortex chez des méditants expérimentés ou chez des personnes ayant suivi une intervention de méditation.

Dans ce contexte, notre étude a pour objectif : (1) confirmer l'effet du motif sulcal du CCA sur l'efficacité du CI en pré-test, chez l'enfant et l'adolescent ; (2) examiner si le motif sulcal du CCA participe à la réceptivité à l'apprentissage du CI, à la suite de deux interventions entraînant les compétences inhibitrices, soit par voie directe (entraînement cognitif, EC), soit par voie indirecte via la méditation de pleine conscience (PC), en comparaison à un groupe de contrôle actif ; (3) évaluer si l'âge peut moduler les effets sur la réceptivité à l'apprentissage. Conformément à la littérature, nous anticipons de meilleures performances de CI en pré-test chez les personnes ayant des motifs asymétriques en comparaison aux motifs symétriques. De surcroît, nous faisons l'hypothèse que le motif sulcal du CCA contribuera à un gain de performance du CI à la fois sur le Stroop et l'ANT, et ce spécifiquement dans les groupes EC et PC. Finalement, nous nous attendons à ce que l'âge n'influence pas l'effet des motifs sulcaux du CCA sur la réceptivité à l'apprentissage, étant donné leur stabilité de la fin de l'enfance jusqu'à l'âge adulte. A notre connaissance, cette étude fournit la première évaluation empirique de l'effet des motifs sulcaux du CCA sur la réceptivité à l'apprentissage du CI selon une perspective développementale.

## **3.2. Méthode**

### **3.2.1. Participants**

Cent quatre-vingt-seize participants sains, dont 105 enfants (60 filles,  $9.38 \pm 0.49$  ans, 9-10 ans) et 91 adolescents (55 filles,  $16.36 \pm 0.48$ , 16-17 ans) ont été admis selon les critères du projet APEX, précédemment détaillés. Cent-soixante-quatorze participants, à savoir 94 enfants (dont 53 filles) et 80 adolescents (dont 51 filles), ont accompli l'ensemble de sessions d'entraînement et ont été évalués en posttest.

### **3.2.2. Acquisitions IRM**

Les images anatomiques obtenues en IRM pondérées en T1 ont été acquises avec des coupes axiales contiguës de 1mm selon les paramètres indiqués précédemment. Il est important de souligner que les paramètres des séquences d'acquisition ont été optimisés dans chaque site, i.e. la plateforme Cyceron à Caen pour les enfants et la plateforme du CIREN à Paris pour les adolescents, afin d'obtenir des acquisitions similaires pour les deux lieux.

### **3.2.3. Sessions de pré- et post-intervention**

Les participants ont effectué une tâche classique de CI, i.e. le Stroop cognitif, ainsi qu'une tâche évoquant plus largement les compétences attentionnelles, l'Attention Network Task (ANT, Fan et al., 2002). Cette tâche-ci permet d'évaluer le contrôle exécutif, dont l'inhibition (Diamond, 2013; Grinspun et al., 2020) et d'explorer les mécanismes de régulation attentionnelle mis en œuvre lors de la méditation de pleine conscience (Hölzel et al., 2011). De même, le CCA est considéré un hub majeur du réseau d'attention exécutive (Posner et al., 2007), ce qui soutient le choix de la tâche. La réceptivité de l'entraînement cognitif a été évaluée à partir des changements en pré et posttest sur le temps de réaction aux essais réussis dans les deux tâches.

### 3.2.4. Segmentation des sillons

La segmentation des sillons a été effectuée à l'aide du logiciel BrainVISA 4.2 par la boîte à outils Morphologist (<http://brainvisa.info>). Lors d'une étape automatisée de prétraitement des scans T1, le crâne a été supprimé et les tissus cérébraux ont été séparés. Considérant que le processus de normalisation spatiale peut engendrer des distorsions sur la forme des sillons, aucune normalisation spatiale n'a été appliquée aux images. Les plissements de la surface corticale ont été segmentés de manière automatique en ayant pour base le squelette du masque de matière grise/ liquide céphalo-rachidien. Ces plissements représentent les vallées du paysage cortical, dont l'altitude reflète leur intensité sur les IRM. Leur forme n'est pas affectée par les variations de l'épaisseur corticale ou par contraste entre la matière grise et la matière blanche, demeurant stable et robuste au fil du temps (Cachia et al., 2021b; Mangin et al., 2019). Finalement, pour chaque individu, les étapes de traitement des images ont été vérifiées visuellement afin d'éviter que les erreurs de segmentation ne passent inaperçues.

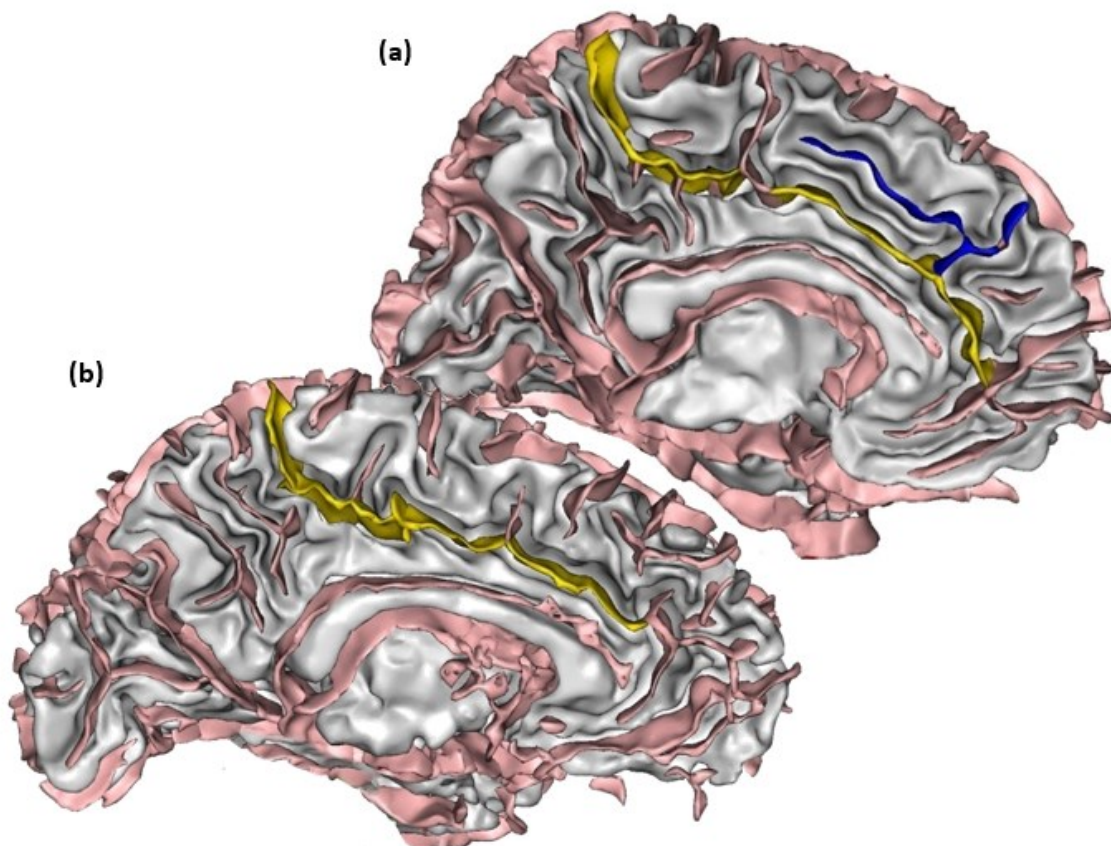
### 3.2.5. Classification du CCA

Le motif sulcal du CCA a été classé selon l'absence ou la présence du SPC à partir de reconstruction tridimensionnelle du cortex à partir des images obtenues à T0 suivant la procédure décrite dans (Cachia 2014). Le SPC a été repéré sur la partie dorsale du sillon cingulaire, parallèle à celui-ci (Ono et al., 1990; Paus et al., 1996; Yücel et al., 2001). Afin d'éviter toute ambiguïté de la rencontre du SPC et du sillon cingulaire avec le sillon rostral supérieur, également appelé sillon supra-orbitaire supérieur, la limite antérieure du SPC a été déterminée à partir du point où le sillon apparaît à l'arrière d'une ligne verticale imaginaire, perpendiculaire à la ligne qui passe par les commissures antérieure et postérieure (Yücel et al., 2001). Le SPC a été catégorisé comme étant absent lorsqu'il n'y avait pas de sillon horizontal explicitement dessiné, présentant une longueur de 20 mm minimum. Les possibles interruptions au sein du SPC n'ont pas été considérées dans la longueur totale du sillon. Comme nous avons analysé des cerveaux d'enfants et d'adolescents, toutes les mesures de longueur du SPC ont été effectuées dans l'espace MNI après un recalage spatial global linéaire



avec le logiciel FSL ([www.fmrib.ox.ac.uk/fsl](http://www.fmrib.ox.ac.uk/fsl)) afin de contrôler les différences de taille cérébrale associées à l'âge. A l'instar de nombreuses études (e.g. Borst et al., 2014; Cachia et al., 2016; Fornito et al., 2004, 2007; Tissier et al., 2018), nous avons suivi la classification d'Ono (Ono et al., 1990) qui catégorise les motifs sulcaux selon deux types, i.e. un type « simple », caractérisé par l'absence du SPC, et un type dit « double parallèle » avec le SPC (Figure 1). Les labélisations ont été réalisées en aveugle pour les données comportementales, démographiques, le groupe d'entraînement et la labélisation dans l'hémisphère opposé. Un second examinateur a réévalué les images pour chaque hémisphère afin d'assurer la fidélité inter-juges.

Nous avons catégorisé les cerveaux de 89 enfants et 73 adolescents. Au total, les motifs sulcaux du CCA de 162 individus, dont 99 filles, ont été classés selon la nomenclature d'Ono, comptabilisant 324 hémisphères. Chez les enfants, 48 cerveaux (53,93%) ont été considérés symétriques. Chez les adolescents, ce nombre décroît à 33 cerveaux (45,21%). Les classifications ont été réalisées après l'attribution des groupes d'entraînement.



**Figure 1.** Motifs sulcaux du CCA dans l'échantillon : a) motif double parallèle ; b) motif simple

### **3.2.6. Interventions**

Comme nous l'avons déjà évoqué, tous les entraînements (EC, PC et CA) ont été effectués à raison de 15 minutes par jour, cinq jours par semaine pendant cinq semaines, selon les paramètres spécifiés en Introduction générale.

### **3.2.7. Evaluation comportementale**

Afin d'évaluer la gestion de l'interférence et le réseau attentionnel, nous avons choisi respectivement le Stroop et l'ANT. Pour les deux tâches, nous avons calculé les TR en secondes sur les essais réussis chez chaque individu. Pour le Stroop, à l'exemple des études réalisées précédemment, nous avons calculé les scores d'interférence uniquement sur les essais ayant une incongruence à la fois perceptive et motrice. Pour l'ANT, nous avons pris en compte l'ensemble des sous-composantes, i.e. « orientation », « alerte » et le conflit exécutif afin d'examiner le construit complexe de l'attention. Un aperçu de l'étude est présenté sur la Figure 2.

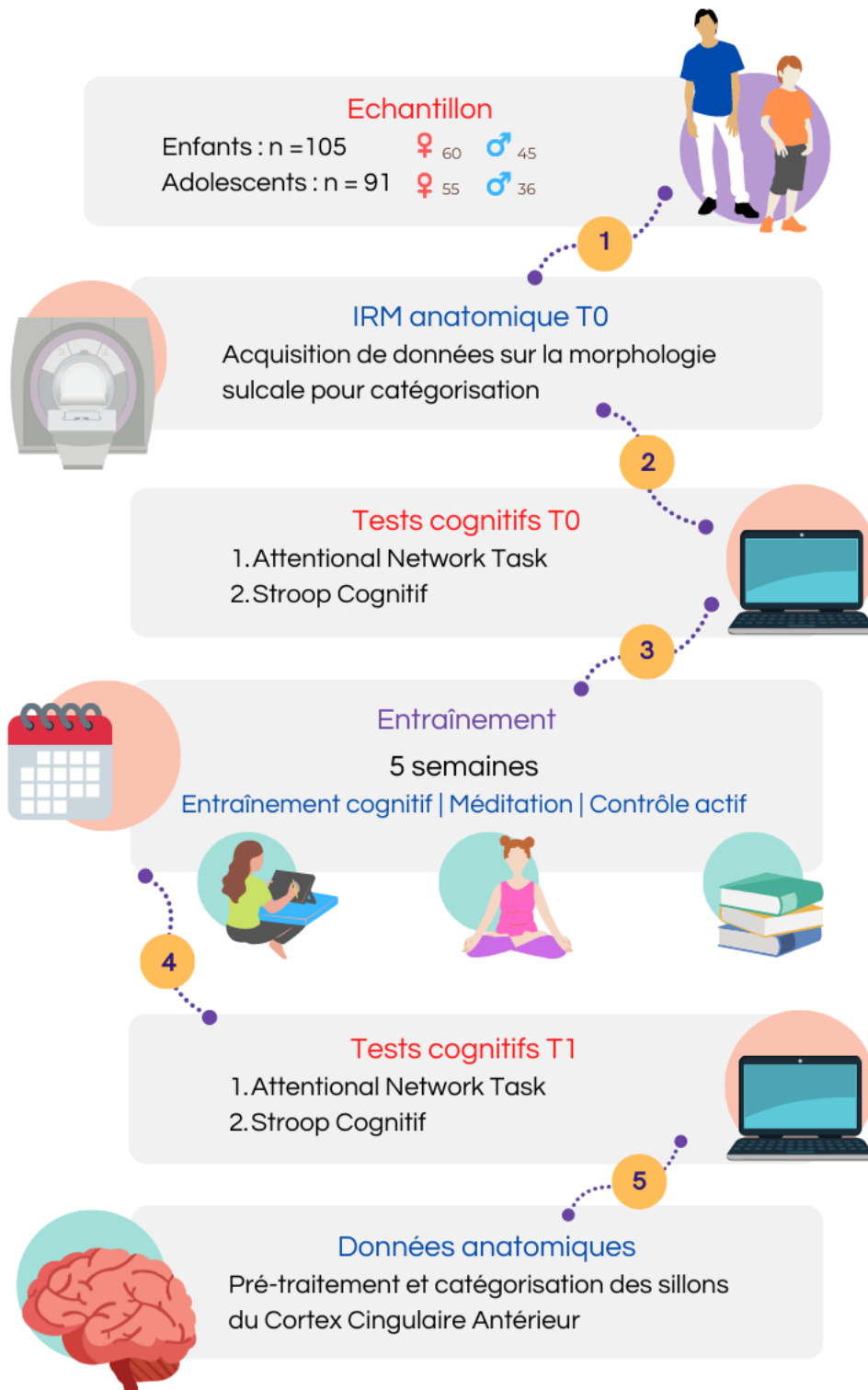


Figure 2. Aperçu de l'étude

### 3.2.8. Analyses statistiques

Afin d'évaluer l'effet des motifs sulcaux sur l'efficacité du CI en pré-test, i.e. le score de base de Stroop et de temps de réponse à l'ANT, nous avons réalisé un modèle linéaire avec le motif sulcal du CCA (asymétrique versus symétrique), le sexe (filles versus garçons) et le groupe d'âge (enfants versus adolescents) comme facteurs inter-sujets. Par ailleurs, nous avons ajusté un modèle linéaire à effet mixtes à la fois sur le score de Stroop et de l'ANT avec la session (pré-test versus posttest) comme facteurs intra-sujet ; le groupe d'intervention (EC versus PC versus CA), le groupe d'âge (enfant versus adolescent) et le sexe (filles versus garçons) comme facteurs inter-sujet et les participants comme facteur aléatoire. Ces modèles à effets mixtes sont adaptés à la gestion des données manquantes dans les modèles à mesures répétées. Nous avons ensuite réalisé une analyse de la variance (ANOVA) pour évaluer les effets principaux et leurs interactions, puis des comparaisons post-hoc corrigées par Tukey.

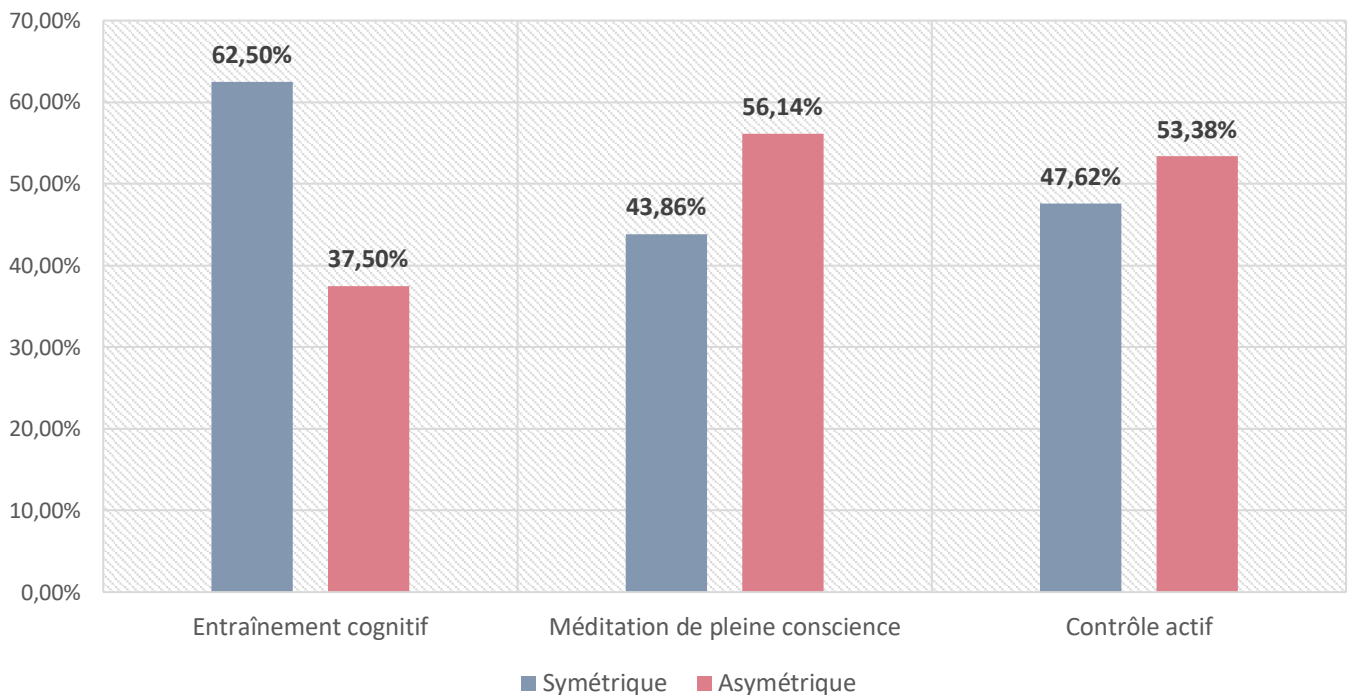
Une valeur p bilatérale inférieure à 0.05 a été considérée comme statistiquement significative. Toutes les analyses statistiques ont été conduites sur le logiciel R 4.1.0 (<http://www.r-project.org/>) et les packages « tidyverse », « car », « multcomp », « lme4 » et « emmeans » pour le traitement des données et l'analyse des modèles linéaires à effets mixtes. En accord avec nos hypothèses, les post-hocs ont été effectués sur les résultats impliquant l'effet de la symétrie du CCA.

## 3.3. Résultats

En premier lieu, nous nous sommes assurés que la fréquence des motifs sulcaux ne différait pas significativement entre les sexes, les âges et les groupes d'entraînement (Table 1). La distribution des motifs selon les groupes d'intervention est affichée sur la Figure 3.

**Table 1.** Fréquence des motifs sulcaux du CCA selon l'âge, le sexe et le groupe d'entraînement

	Différences		
	Symétrique	Asymétrique	(statistiques / p-value)
<b>Total N</b>	95	89	
<b>Enfant/Adolescent</b>	55/40	45/44	$\chi^2(182) = 1.00 / p=0.32$
<b>Fille/Garçon</b>	57/38	53/36	$\chi^2(182) = 0.004 / p=0.95$
<b>Groupes (EC,PC,CA)</b>			$\chi^2(181) = 4.85 / p=0.09$



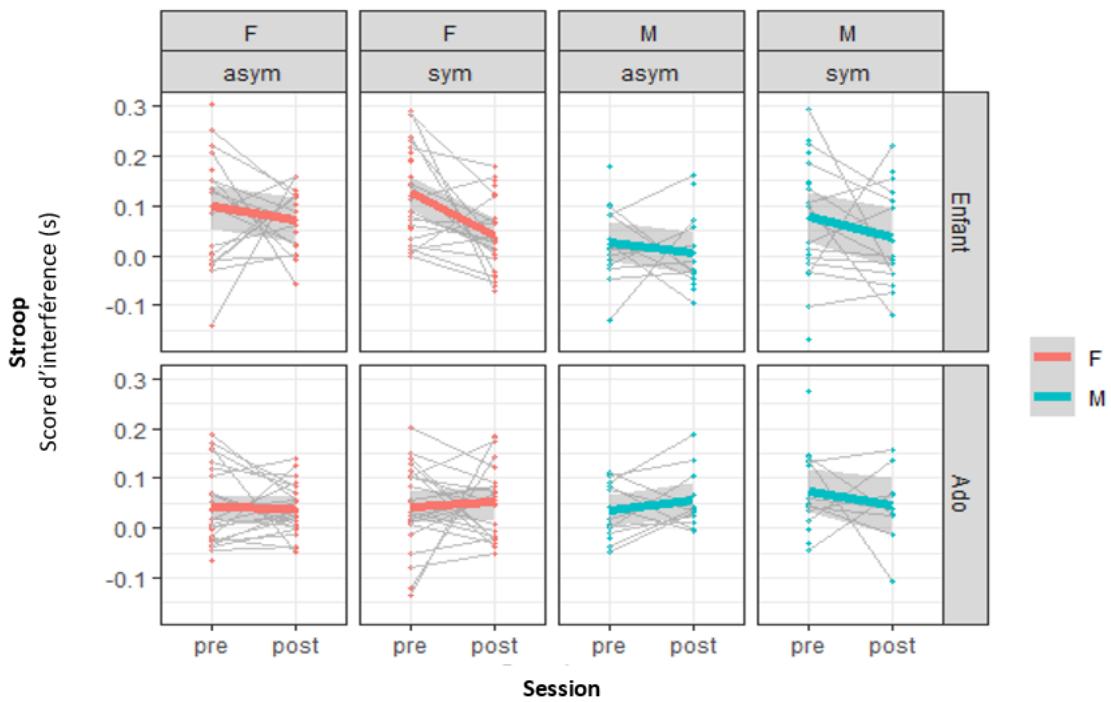
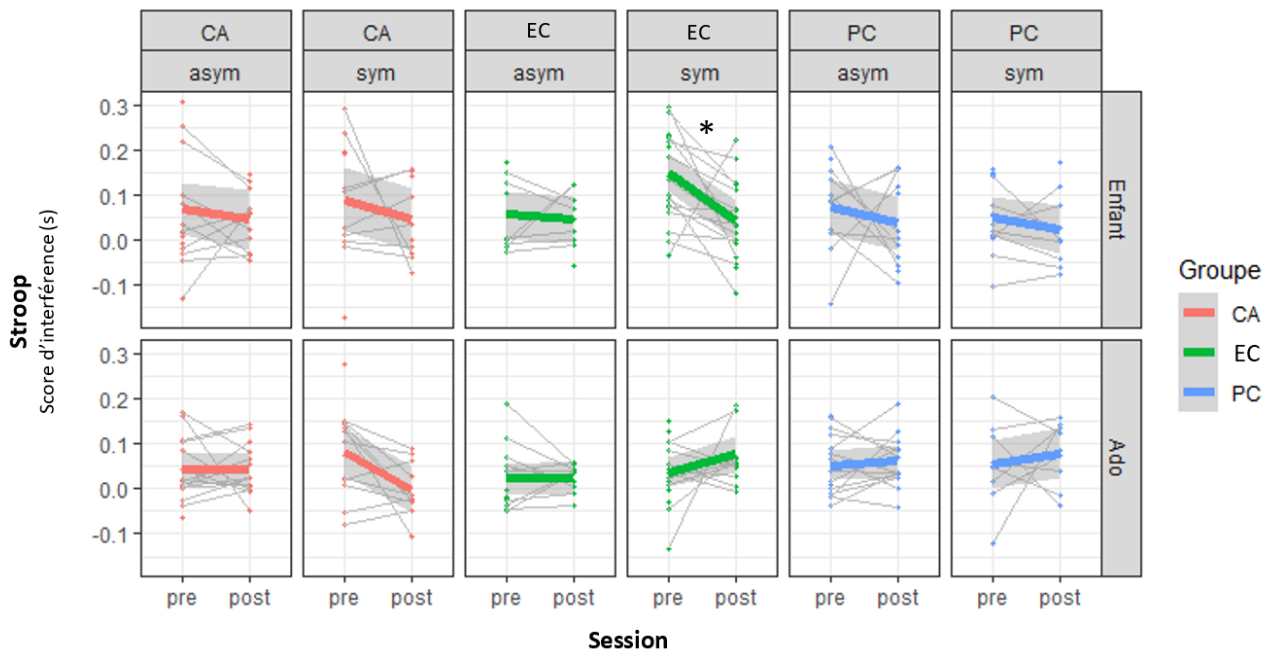
**Figure 3.** Distribution des motifs sulcaux du CCA au sein de chaque groupe d'entraînement

Globalement, les résultats en pré-test indiquent un effet principal tendanciel, proche de la significativité, du motif sulcal du CCA sur les scores de Stroop,  $F(155) = 3.89$ ,  $p = 0.05$ ,  $\eta^2 p = .02$ , les participants avec des motifs asymétriques ( $M = 0.05 \pm 0.09$ ) présentant de meilleures performances que ceux ayant des motifs symétriques ( $0.08 \pm 0.10$ ). Nous avons également relevé un effet significatif de l'âge,  $F(155) = 4.94$ ,  $p < 0.05$ ,  $\eta^2 p = .03$ , et une interaction entre l'âge et le sexe,  $F(155) = 6.10$ ,  $p < 0.05$ ,  $\eta^2 p = .04$ . En ce qui concerne les temps de réponse à l'ANT en pré-test, une interaction tendancielle, proche de la significativité, a été observée entre le motif sulcal et le sexe,  $F(168) = 3.78$ ,  $p = 0.05$ ,  $\eta^2 p = .02$ . Les post-hocs sur cette interaction n'ont pas révélé des résultats significatifs. En outre, le motif asymétrique a été

associé à une performance plus efficace à l'ANT en pré-test ( $0.57 \pm 0.15$ ) que le motif symétrique ( $0.61 \pm 0.15$ ), mais cet effet n'est pas statistiquement significatif ( $p > 1.0$ ). Finalement, nous soulignons un effet de l'âge en pré-test,  $F(168) = 418.24$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2_p = .71$ .

Le modèle à effet mixtes sur le score d'interférence de Stroop a révélé un effet principal significatif de la session,  $\chi^2(1) = 7.16$ ,  $p < 0.01$ , avec de meilleures performances lors du posttest en comparaison au pré-test. Les analyses ont également révélé un effet du groupe d'âge,  $\chi^2(1) = 4.54$ ,  $p < 0.05$ , avec de meilleures performances chez les adolescents par rapport aux enfants, ainsi qu'un effet principal significatif du sexe,  $\chi^2(1) = 4.98$ ,  $p < 0.05$ , les filles étant plus performantes que les garçons. En outre, les résultats ont indiqué une interaction double entre le groupe d'âge et le sexe,  $\chi^2(1) = 9.95$ ,  $p < 0.01$ , avec des changements liés à l'âge des participants, spécifiques au genre (figure 2), ainsi qu'une interaction triple entre le groupe d'âge, le sexe et le groupe d'intervention,  $\chi^2(2) = 6.17$ ,  $p < 0.05$ , signalant différents changements liés au groupe d'âge selon le groupe d'intervention et le sexe. Une interaction quadruple a été détectée entre la session, le groupe d'intervention, le groupe d'âge et le sexe,  $\chi^2(2) = 10.72$ ,  $p < 0.01$ , ainsi qu'une interaction quadruple entre la session, le groupe d'âge, la symétrie et le sexe,  $\chi^2(1) = 5.28$ ,  $p < 0.05$ , suggérant des changements associés aux motifs sulcaux du CCA selon l'âge et le sexe des participants entre le pré et le posttest. De même, une interaction tendancielle a été observée entre la session, le groupe d'intervention, le groupe d'âge et les motifs sulcaux,  $\chi^2(2) = 4.77$ ,  $p = 0.09$  (Figure 4). Les autres effets principaux et interactifs n'étaient pas significatifs (tous les  $ps > 0.13$ ).

Les comparaisons post-hoc sur le Stroop ont révélé une amélioration significative entre le pré et le posttest exclusivement chez les petites filles ayant des motifs symétriques ( $\beta = -0.09 \pm 0.02$ ,  $t = -3.82$ ,  $p < 0.05$ ). Cela n'est pas le cas chez les enfants du sexe masculin présentant un motif symétrique ( $\beta = -0.02 \pm 0.03$ ,  $t = -0.71$ ,  $p = 1.0$ ) ou les adolescentes avec ce motif ( $\beta = 0.01 \pm 0.02$ ,  $t = -0.48$ ,  $p = 1.0$ ), ce qui suggère un effet de la symétrie sur la réceptivité à l'apprentissage selon le sexe et le groupe d'âge (Figure 5). En outre, les enfants ayant un motif symétrique du CCA bénéficient significativement de l'intervention EC avec une amélioration plus marquée des scores entre le pré et le posttest ( $\beta = -0.11 \pm 0.03$ ,  $t = -3.99$ ,  $p < 0.05$ ). On n'observe pas ce gain de performance chez les enfants présentant un motif symétrique après avoir suivi la méditation de pleine conscience ( $\beta = -0.03 \pm 0.04$ ,  $t = -0.73$ ,  $p = 1.0$ ) ou chez le groupe contrôle actif ( $\beta = -0.04 \pm 0.03$ ,  $t = -1.02$ ,  $p = 1.0$ ). Aucune comparaison significative n'a été obtenue pour les motifs asymétriques ou chez les adolescents ( $ps \geq 1.0$ ).

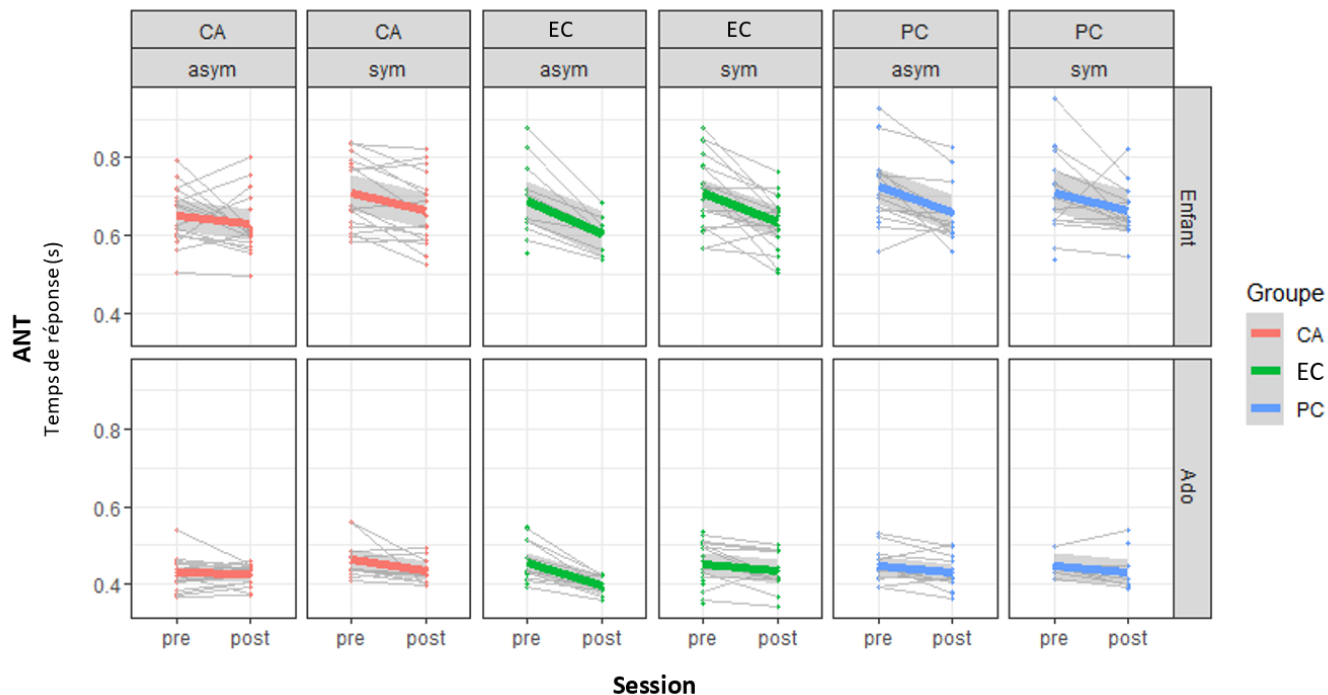


**Figure 3.** Effet des motifs sulcaux sur les scores de Stroop entre le pré et le posttest chez les enfants et les adolescents selon le sexe

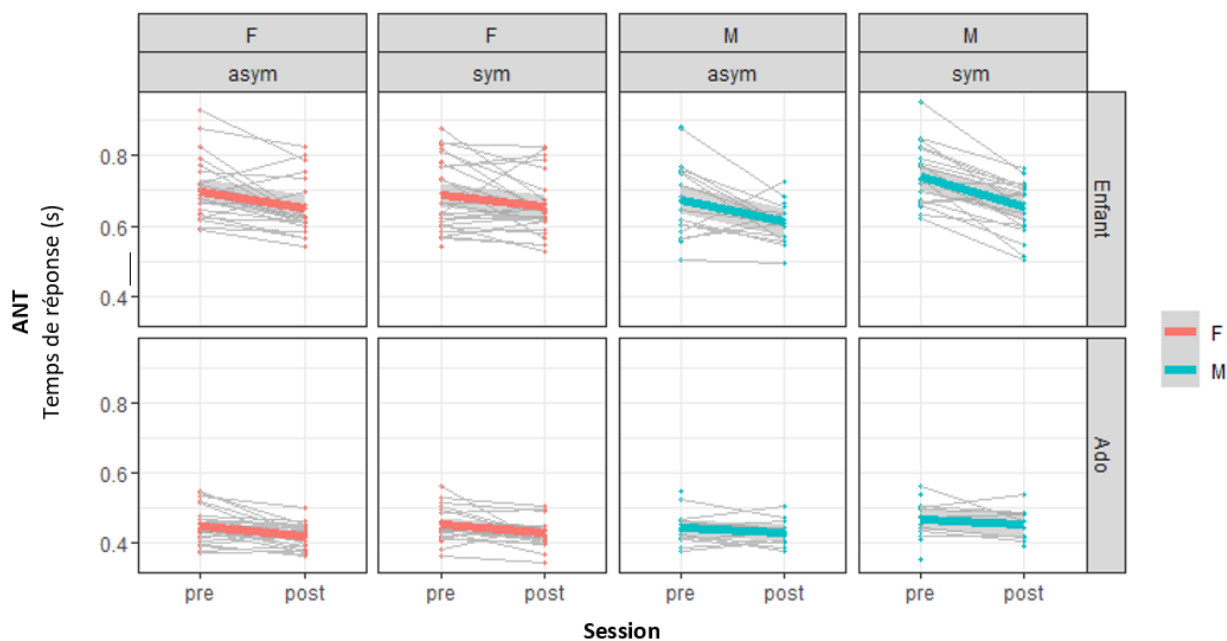
Les analyses sur les scores de l'ANT ont révélé un effet principal significatif de la session,  $\chi^2(1) = 64.39$ ,  $p < 0.001$ , avec de meilleures performances lors du posttest par rapport au pré-test, ainsi qu'un effet du groupe d'âge,  $\chi^2(1) = 574.95$ ,  $p < 0.001$ , marqué par de meilleures performances chez les adolescents en comparaison aux enfants. De plus, un effet principal tendanciel des motifs sulcaux a été repéré,  $\chi^2(1) = 2.85$ ,  $p=0.09$ , l'asymétrie du CCA étant tendanciellement associée à de scores plus performants que le motif symétrique. Par ailleurs, nous avons observé une interaction double significative entre la session et le groupe d'âge,  $\chi^2(1) = 9.11$ ,  $p < 0.01$ , avec des changements associés au temps, spécifiques à l'âge, ainsi qu'une interaction double entre la session et le groupe d'intervention,  $\chi^2(2) = 8.43$ ,  $p < 0.05$ , signalant différents changements dans le temps selon le type d'entraînement effectué (Figure 6). Une interaction double tendancielle a été retrouvée entre les motifs sulcaux et le sexe,  $\chi^2(2) = 8.43$ ,  $p < 0.05$  et la session, le groupe d'âge et le sexe,  $\chi^2(1) = 3.74$ ,  $p=0.05$  (Figure 7). Les autres effets principaux et d'interaction n'étaient pas significatifs (tous les  $ps > 0.11$ ).

Les comparaisons post-hoc ont confirmé que le motif sulcal asymétrique du CCA est tendanciellement associé à des meilleurs scores sur l'ANT que le motif asymétrique, ( $\beta = -0.02 \pm 0.01$ ,  $t = -1.91$ ,  $p = 0.06$ ). Néanmoins, les analyses post-hoc sur l'interaction entre les motifs sulcaux et le sexe n'ont révélé aucun effet significatif (tous les  $ps > 0.14$ ).





**Figure 6.** Effet des motifs sulcaux sur les scores de l'ANT entre le pré et le posttest chez les enfants et les adolescents



**Figure 7.** Effet des motifs sulcaux sur les scores de l'ANT entre le pré et le posttest chez les enfants et les adolescents selon le sexe

### 3.4. Discussion

Dans cette étude, nous avons examiné l'effet de la morphologie sulcale du CCA sur l'efficacité du CI et la réceptivité à deux interventions sollicitant les compétences d'inhibition, soit par voie directe, soit indirectement par le biais de la méditation de pleine conscience. Nous avons relevé un effet tendanciel, proche de la significativité, des motifs sulcaux du CCA sur l'efficacité au Stroop en pré-test. Conformément à la littérature, les participants ayant une asymétrie du CCA ont exhibé de meilleures performances inhibitrices en comparaison à ceux avec des motifs symétriques. Bien que statistiquement non significatif, cet effet se manifeste dans la même direction sur l'ANT en pré-test, suggérant que le sens de cette relation est consistante.

Il est connu que la tâche de Stroop fait intervenir plusieurs processus cognitifs, tels que la surveillance et la détection des conflits, l'attention sélective, la mémoire de travail, l'interférence perceptive et sémantique (MacLeod et al., 2003). Certains de ces processus intègrent le construit complexe et pas toujours unanime de l'inhibition (MacLeod et al., 2003). Dans cette optique, diverses critiques ont été adressées à la mesure même de l'effet Stroop, qui impliquerait une interférence dite composite, mettant en jeu à la fois un conflit de réponse, i.e. l'interférence entre deux actions concurrentes, et un conflit nommé sémantique, i.e. la rétention de la dimension de la couleur et l'inhibition du sens du mot écrit (Augustinova et al., 2016; Burca et al., 2021, 2022). Le premier semble être plus sensible aux effets de l'âge, alors que le conflit sémantique demeure pratiquement inchangeable (Burca et al., 2022). De même, les interventions expérimentales ayant pour but de diminuer l'effet de Stroop affectent plutôt le conflit de réponse et non le conflit sémantique (Augustinova et al., 2016). La difficulté est donc de saisir la part de chaque conflit dans la tâche de Stroop afin de mieux déceler la dynamique des processus cognitifs qui y sont engagés, notamment lorsqu'il s'agit de les associer à des substrats cérébraux (Augustinova et al., 2016; Burca et al., 2021, 2022). Dans notre étude, c'est précisément sur l'habileté à surmonter les conflits perceptuels et cognitifs afin d'inhiber une réponse dominante que la morphologie sulcale du CCA semble exercer une influence, de par le rôle même du CCA avancé par la littérature (e.g. Borst et al., 2014; Cachia et al., 2014).

Des études d'imagerie (Bush et al., 2000; Casey et al., 2000; Kolling et al., 2016; Shenhav et al., 2016) renforcent ce postulat, révélant des activations de la partie dorsale du CCA lors de la tâche de Stroop et d'autres qui requièrent le contrôle du conflit afin de produire une réponse pertinente (Petersen & Posner, 2012). En effet, l'activité du CCA dorsal signale la détection d'erreurs et la présence de récompenses qui contribuent au changement ou au maintien du comportement en cours (Kolling et al., 2016). Durant la prise de décision sur une tâche, par exemple, les valeurs de chaque réponse sont encodées dans cette structure, ainsi que l'historique des décisions déjà prises et les ajustements précédents (Shenhav et al., 2016). Cela permet la mise à jour des réponses et leur comparaison sur un passé récent et étendu, ce qui soutient son rôle dans le contrôle exécutif (Kolling et al., 2016). Casey et al. (2000) avancent également une dissociation importante des systèmes impliqués dans la détection du conflit et la sélection attentionnelle au sein d'un même type de tâche. En détail, lorsque les sujets s'orientent dans le champ visuel, les régions pariétales supérieures et frontales supérieures sont systématiquement activées, constituant le réseau de contrôle de l'attention spatiale. Cependant, lorsqu'il est nécessaire de répondre à un aspect d'un stimulus et ignorer les aspects concurrents, les activations les plus marquées sont observées dans le CCA et le cortex préfrontal dorsolatéral. Etant donné la place du CCA pour chacune des tâches effectuées dans notre étude, ces arguments peuvent traduire un effet plus important de la morphologie sulcale du CCA lors du Stroop que sur l'ANT en pré-test. Cela suggère que cet effet peut être plus marqué, voire spécifique, sur l'habileté à surmonter les conflits perceptuels et cognitifs pour inhiber une réponse prépotente (MacLeod, 1991). Similairement, dans deux études chez l'enfant, un effet de la morphologie sulcale du CCA a été rapporté exclusivement sur la tâche de Stroop, mais non sur la mémoire de travail verbale, mesurée par l'empan de chiffres à l'endroit et à l'envers (Borst et al., 2014; Cachia et al., 2014).

Nous avons également repéré des changements significatifs entre le pré et le posttest sur les scores de Stroop, associés aux motifs sulcaux du CCA, au sexe et à l'âge des participants. Des changements tendanciels entre les deux temps d'évaluation ont été observés selon le groupe d'intervention, le groupe d'âge et les motifs sulcaux. Cela corrobore en partie notre hypothèse concernant le rôle des motifs sulcaux sur l'entraînement des compétences d'inhibition, mais infirme notre argument à propos de l'absence d'un effet de l'âge sur les motifs des sillons et le gain de performance du CI. Ainsi, uniquement les enfants ayant un motif symétrique du CCA ont pu améliorer leurs performances de Stroop entre le pré et le

posttest. Plus précisément, seuls les enfants ayant suivi l'entraînement cognitif ont affiché un gain de performance significatif au Stroop entre les deux temps d'examen, cela n'étant le cas pour les enfants dans le groupe de méditation ni ceux assignés au groupe de contrôle actif. De même, chez les enfants, ce sont uniquement les filles ayant des motifs symétriques qui ont eu des améliorations significatives au Stroop entre le pré et le posttest.

De nombreuses réflexions émergent des résultats observés. Premièrement, l'effet du motif sulcal sur le gain de performance d'inhibition concerne uniquement le motif symétrique. Il est possible que cela soit dû à un effet de compensation, i.e. la performance de base plus faible est associée à des gains d'entraînement plus importants (Diamond & Lee, 2011a; Karbach, 2016). En effet, les individus présentant des motifs symétriques ont des performances d'inhibition plus faibles que les participants avec des motifs asymétriques, conformément à la littérature (pour une revue récente, voir Cachia et al., 2021). Ils ont donc été possiblement plus réceptifs aux bénéfices de l'entraînement cognitif visant directement les compétences inhibitrices (Karbach, 2016; Karbach & Unger, 2014a), étant donné la marge de progrès pour l'amélioration de la performance. Deuxièmement, cela peut fournir des explications à l'effet de l'âge retrouvé en interaction avec les sessions d'évaluation et les motifs sulcaux. Les enfants ayant des performances inhibitrices nettement inférieures à celles des adolescents, cela les identifie comme des candidats plus propices à un gain marqué à la suite des entraînements proposés. Ajoutons à cela un potentiel effet plafond chez les adolescents, suggérant que la tâche n'est possiblement pas assez sensible pour rendre compte des compétences réelles de cette tranche d'âge. Dans ce sens, la dynamique entre la morphologie sulcale et l'âge serait plutôt liée à la capacité de bénéficier de l'entraînement cognitif proposé qu'à la performance inhibitrice ponctuelle.

Il est connu que les performances cognitives générales s'améliorent de l'enfance à l'âge adulte, notamment en raison du développement neurocognitif (Fuhrmann et al., 2015; Knoll et al., 2016) et de la plasticité cérébrale (Green & Bavelier, 2008a; Tymofiyeva & Gaschler, 2021). Considérant que l'enfance et l'adolescence constituent deux fenêtres neuroplastiques, il est plausible d'imaginer que les compétences exécutives peuvent bénéficier d'un entraînement cognitif lors de ces deux périodes, voire plus durant l'adolescence puisque les performances aux tâches exécutives s'améliorent de manière importante au cours de cette phase (Dumontheil et al., 2010). Cependant, pour que le progrès soit effectif, l'engagement dans les tâches doit l'être également. Ainsi, il est nécessaire que le

défi cognitif imposé par l'entraînement exécutif soit suffisamment adapté pour que le gain soit véritable (Beauchamp et al., 2019). Dans notre étude, il est probable que les tâches utilisées pour l'évaluation comportementale en pré et posttest ne permettent pas un gain significatif de performance chez les adolescents. Autrement dit, les adolescents ont déjà atteint le seuil de performance en pré-test, ce qui permet peu de progrès pour la suite. Par ailleurs, cette tranche d'âge a été potentiellement affectée par un effet plafond, considérant les tâches possiblement peu sensibles vis-à-vis de ses compétences. Par exemple, des études développementales employant le Stroop ont pu démontrer que les différences de temps de réponse sont plus sensibles à l'âge que la précision des réponses, ce qui suggère un effet plafond plus important avec l'âge (voir Klenberg et al., 2015). La littérature sur l'entraînement au CI chez les adolescents étant encore à ses débuts (Hatfield et al., 2018), il est difficile de converger sur l'ensemble des facteurs pouvant influencer leur réceptivité à l'apprentissage, tels que la présentation des récompenses, le design ludique de l'entraînement ou l'inclusion d'éléments sociaux (Beauchamp et al., 2019). Cela est essentiel pour engager la motivation des adolescents, puisque des changements importants s'opèrent sur le système dit motivationnel au cours de cette période (Luciana & Collins, 2012). Dans le contexte particulier des remaniements corticaux (Gogtay et al., 2004), la motivation est également facilitée par la dopamine qui subit des altérations conséquentes durant l'adolescence (Luciana & Collins, 2012), tels que les pics de concentration de dopamine dans les tissus et les modifications de la densité des transporteurs dopaminergiques notamment dans le striatum et le cortex préfrontal (Depue & Collins, 1999). Ces altérations s'associent à la dynamisation du comportement, caractérisé par l'approche de la nouveauté plutôt que son évitement (Luciana & Collins, 2012). Ayant une fonction adaptative ontogénétique, la motivation chez l'adolescent entretient la quête pour la nouveauté et l'acquisition immédiate de récompenses, ce qui alimente la réflexion sur les interventions le plus adaptées à ce public.

Troisièmement, l'absence des résultats significatifs pour le groupe ayant suivi la méditation de pleine conscience peut aussi reposer sur l'effet spécifique de la morphologie sulcale du CCA sur le CI. Les compétences engagées par la pratique méditative étant complexes, le CI n'y est sollicité que de manière indirecte, souvent via le contrôle attentionnel (Tang et al., 2015). Il est donc possible que cette intervention n'ait pas été suffisamment efficace sur la capacité à surmonter les conflits perceptuels et cognitifs afin de sélectionner une réponse pertinente pendant la tâche de Stroop.

Parallèlement, l'effet du sexe en faveur des filles sur le gain de performance au Stroop est cohérent avec les résultats de la littérature. Dans l'étude de Mansouri et al. (2016), les femmes ont bénéficié significativement plus que les hommes d'un entraînement au CI basé sur la tâche Stop Signal, caractérisé par une efficacité marquée sur les essais go et stop. Les auteurs mettent l'accent sur l'absence de différences de genre dans les performances en pré-test, ce qui démontre l'effet du sexe sur la progression des capacités inhibitrices après la pratique. Li et al. (2009) ont révélé des activations différentes en IRM fonctionnelle chez un public féminin et masculin effectuant la tâche Stop Signal, malgré l'absence de différences comportementales significatives. Cela suggère que les femmes et les hommes engagent des réseaux neuronaux différents dans l'inhibition de l'interférence, voire dans l'ensemble des processus caractérisant le CI. Néanmoins, cette distinction des habiletés d'inhibition en fonction du genre n'est pas unanime dans la littérature. Wierenga et al. (2019) suggèrent que les différences de sexe observées dans la performance exécutive sont plutôt dues aux facteurs environnementaux et la mise en place de stratégies distinctes plutôt qu'au développement biologique.

Aucune interaction comprenant la session et les motifs sulcaux n'a été observée pour l'ANT dans notre étude, i.e. aucun changement significatif entre le pré et le posttest accompagnant la morphologie sulcale du CCA. Néanmoins, un effet principal tendanciel des motifs sulcaux a été repéré pour cette tâche, allant dans le même sens que celui avancé par la littérature, i.e. les motifs asymétriques sont associés à de meilleures performances que les motifs symétriques dans un modèle considérant l'apprentissage. Il est probable que cet effet tendanciel, absent en pré-test, soit dû aux aspects exécutifs de l'ANT, sollicités sur les deux temps d'évaluation. De plus, un effet significatif du sexe et des motifs sulcaux sur les scores de l'ANT a été mis en évidence, indiquant que le dessin des sillons interagit avec le genre sur l'efficacité cognitive. Par ailleurs, nous mettons l'accent sur le fait que l'ANT n'était probablement pas une tâche adaptée pour l'ensemble de participants car, par souci de comparaison, nous avons opté pour la version adressée aux enfants (Rueda et al., 2004) pour tout l'échantillon.

De futures études peuvent approfondir la catégorisation de la morphologie sulcale du CCA, comme celle utilisée par Yücel et al. (2001), selon laquelle le SPC peut être classé en trois catégories : proéminent, présent et absent. La catégorie "proéminent" définit le SPC mesurant plus de 40 mm de long, alors que le sillon "présent" s'étend entre 20 mm et 40 mm. Les

différences de genre dans la fréquence d'apparition du SPC ont été démontrées principalement par le biais de cette triple catégorisation (Paus et al., 1996; Wei et al., 2017; Yücel et al., 2001). Par exemple, Paus et al. (1996) ont constaté que les femmes ont tendance à avoir soit un SPC proéminent, soit absent, tandis que les hommes présentent surtout le type intermédiaire. Cette classification pourrait donc servir à mieux approfondir la compréhension sur l'interaction entre le genre et la morphologie sulcale au sein de chaque groupe. Néanmoins, comme cette catégorisation se base sur la taille du SPC, les comparaisons impliquant différents groupes d'âge ne sont pas envisageables puisque l'étendue du sillon varie avec l'âge, donc les motifs qui en découlent (Cachia et al., 2016).

Il serait aussi intéressant d'explorer la latéralité de l'asymétrie, i.e. l'hémisphère dans lequel se trouve le SPC chez les personnes présentant des motifs asymétriques. Dans les populations en bonne santé, il se trouve le plus souvent dans l'hémisphère gauche. En outre, il a été démontré que l'asymétrie gauche du CCA est positivement corrélée avec des compétences cognitives diverses (Fornito et al., 2004). De plus, étendre l'étude à d'autres sillons peut fournir des éléments supplémentaires à la compréhension de cette dynamique entre les habiletés inhibitrices et les contraintes précoces. Par exemple, le pattern des sillons du Gyrus Frontal Inférieur (GFI), une explication avec les motifs sulcaux du CCA 15 à 20% de la variabilité de la performance à la tâche de Stroop (Tissier et al., 2018).

D'autres études longitudinales avec des échantillons plus importants sont nécessaires pour explorer l'interaction entre les contraintes précoces et les mécanismes neuroplastiques, i.e. la morphologie sulcale et les caractéristiques quantitatives du cerveau sur l'efficacité du CI, telles que l'épaisseur, la surface et le volume. L'association avec ces caractéristiques serait également pertinente pour évaluer l'expérience de méditation (Luders et al., 2012). De même, le lien entre les motifs sulcaux et la méditation de pleine conscience peut être étudié selon les échelles évaluant la prédisposition à la pleine conscience i.e. pleine conscience trait, notamment par les sous-composantes qui impliquent des mesures de l'autorégulation, donc le CI, e.g. le facteur de non-réactivité aux phénomènes psychologiques dans la Five Facets Mindfulness Questionnaire (Lee & Chao, 2012). De surcroît, il serait aussi intéressant de valider l'ensemble de nos observations dans les programmes d'intervention portant sur les habiletés exécutives en milieu scolaire, étant donné que l'entraînement des fonctions exécutives est souvent plus bénéfique pour les individus ayant des performances faibles (e.g. Diamond et al., 2007). Finalement, la comparaison des entraînements exécutifs chez un public

typique et pathologique peut fournir des explications complémentaires sur le lien entre les motifs sulcaux et les capacités d'inhibition, lorsque celles-ci sont optimales ou déficitaires. Compte tenu des suggestions avancées par des études récentes (Kuyken et al., 2022; Montero-Marin et al., 2022), nous mettons cependant l'accent sur le besoin d'une évaluation professionnelle des troubles de l'humeur chez les volontaires avant tout engagement dans la pratique de la méditation de pleine conscience afin d'instaurer un cadre expérimental sain, sécurisé et optimal.

### **3.5. Conclusion**

En fournissant des preuves directes que la morphologie sulcale influence l'efficacité du CI mais aussi de la réceptivité à l'apprentissage des compétences d'inhibition, nous corroborons les bases théoriques indiquant que la vie in utero peut affecter les capacités cognitives ultérieures. L'effet de l'âge retrouvé dans notre étude suscite des questions concernant l'importance des fenêtres neuroplastiques pour l'amélioration du CI, ainsi que la nécessité de valider ces résultats auprès d'autres échantillons plus larges, avec des tâches plus adaptées pour toutes les tranches d'âge. L'ensemble de ces observations nous permet d'éclairer des mécanismes dont l'importance est fondamentale pour les neurosciences du développement.



# CHAPITRE

Discussion générale

### Discussion générale

#### 1.1. Synthèse des résultats

L'objectif principal de cette thèse a été de caractériser les effets de la pratique de la méditation de pleine conscience sur le CI au niveau cognitif, physiologique et neuroanatomique, chez l'enfant et l'adolescent. Notre hypothèse générale était la possibilité d'entraîner le CI via la méditation de pleine conscience, ce qui s'est avéré exact, mais contraint par des particularités mises en exergue par les études expérimentales, résumées ci-dessous.

En premier lieu, nous avons évalué chez 129 participants, enfants et adolescents, les effets de la pratique de la méditation de pleine conscience sur les compétences d'inhibition en spécifiant ses différentes dimensions, i.e. la dimension neutre, dite froide, et la dimension émotionnelle, appelée chaude, et ce dans une perspective développementale. Cette étude s'est portée sur 129 participants typiques, dont 66 enfants et 63 adolescents ayant suivi soit un entraînement cognitif ciblant directement le CI, soit la pratique méditative. Nous avons évalué l'inhibition froide avec le Stroop classique et l'inhibition chaude par le biais du Stroop Emotionnel. Globalement, nous avons pu relever, chez les enfants, un effet positif et spécifique de l'entraînement cognitif ciblant le CI sur les capacités inhibitrices froides, ainsi qu'un effet positif et spécifique de la méditation de pleine conscience sur les compétences de CI chaud, celles-ci renvoyant aux habiletés de gestion émotionnelle (Aïte et al., 2018; Prencipe et al., 2011). Les adolescents ont beaucoup moins bénéficié des interventions proposées.

Par la suite, nous avons exploré chez 91 adolescents l'influence de deux facteurs physiologiques sur les performances d'inhibition, le taux de glycémie sanguine et l'IMC. Nous avons employé le Stroop classique comme mesure de l'inhibition cognitive, i.e. contrôle de l'interférence, et la tâche Stop Signal pour tester l'inhibition de la réponse. Les performances ont été évaluées avant et après deux interventions cognitives entraînant le CI soit par voie directe, i.e. l'entraînement cognitif, soit indirectement par le biais de la méditation de pleine conscience – et ce, par rapport à un groupe de contrôle actif. Pour le niveau de base, la glycémie élevée a été associée à une faible performance au Stroop et une efficacité accrue sur

la tâche Stop Signal chez les adolescents situés sur la moyenne basse de l'IMC. En posttest, le niveau de la glycémie influençait différemment la réussite au Stroop selon l'entraînement suivi, mais les analyses post-hocs n'ont mis aucun effet pré-post en évidence. Il sera donc nécessaire d'approfondir ce sujet afin de mieux saisir les particularités de la dynamique entre le glucose sanguin, l'IMC et les habiletés d'inhibition.

Enfin, nous avons étudié le rôle des contraintes neurodéveloppementales précoces, évaluées indirectement par les motifs sulcaux du cortex cingulaire antérieur (CCA), dont le lien avec les habiletés d'inhibition est largement rapporté dans la littérature (e.g. Borst et al., 2014; Cachia et al., 2014; Fornito et al., 2004; Tissier et al., 2018). Pour cela, nous avons analysé le cerveau de 162 individus, i.e. 89 enfants et 93 adolescents, ainsi que leur performance avant et après les interventions précédemment évoquées. En pré-test, nous avons pu valider l'association entre l'asymétrie du CCA et une efficacité accrue au Stroop cognitif et à l'Attention Network Task (ANT). De plus, le gain de performance au Stroop cognitif entre le pré et le posttest concerne uniquement les enfants du groupe d'entraînement cognitif présentant des motifs symétriques du CCA. Aucun changement n'a été relevé pour l'ANT ni pour le groupe de méditation. Ces résultats mettent en exergue l'importance de considérer la morphologie sulcale du CCA dans l'efficacité du CI mais aussi la réceptivité à son entraînement.

Dans cette discussion générale, notre objectif est d'intégrer les résultats obtenus dans chacune des trois études à la fois au niveau comportemental, physiologique et neurodéveloppementaux. Nous discuterons également la place de la méditation de pleine conscience en tant que pratique sollicitant les compétences d'inhibition. Enfin, nous approfondirons les perspectives expérimentales et translationnelles suscitées par cette thèse, avec un accent particulier sur une perspective éducative axée sur l'amélioration de la régulation émotionnelle.

## **1.2. L'entraînement du CI chez l'enfant et l'adolescent**

### **1.2.1. La méditation de pleine conscience est-elle efficace sur le CI ?**

La question cruciale concernant l'impact réel de la pratique méditative sur les compétences d'inhibition s'inscrit en filigrane dans les conclusions de nos études.

Nos résultats ont suggéré que les enfants bénéficient plus que les adolescents des deux interventions cognitives testées, ce qui va de pair avec la littérature (e.g. Diamond & Lee, 2011; Janacsek et al., 2012). Cet argument est avancé par diverses recherches indiquant l'amélioration des compétences exécutives, particulièrement le CI, à la suite de programmes de méditation de pleine conscience chez des enfants couvrant la même tranche d'âge que celle de notre échantillon (e.g. Flook et al., 2010; Geronimi et al., 2020; Vekety et al., 2022). Ainsi, les effets induits par la méditation semblent présenter des particularités développementales, comme dans le cas de l'entraînement métacognitif qui partage des similarités avec la pratique de la pleine conscience et s'avère plus efficace chez les enfants plus âgés que chez les plus jeunes (Schaeffner et al., 2016).

Dans ce contexte, il est capital de considérer également le développement des composantes du CI dans le temps – d'autant plus que la méditation ciblerait l'aspect chaud des FE (Roeser & Pinela, 2014). Effectivement, les programmes basés sur la pleine conscience exercent la conscience des expériences du moment présent et leur acceptation sans jugement, ce qui permet d'épurer la sensibilité et la réponse aux signaux affectifs du corps et de l'esprit (Hölzel et al., 2011; Roeser & Pinela, 2014). Dans notre Etude 1, les enfants ont amélioré leurs compétences de CI chaud, mais pas froid, après la pratique méditative, atteignant le niveau de base des adolescents. Le CI froid semble donc être moins affecté par la méditation de pleine conscience, tel que cela a été implémenté dans notre projet.

L'efficacité de pratique méditative en tant que moyen pour entraîner le CI chez les adolescents est une question qui demeure en suspens. Des études complémentaires sont nécessaires pour fournir des réponses plus robustes à cet égard. Le nombre limité d'études sur l'entraînement du CI pendant l'adolescence (Hatfield et al., 2018) renvoie à la difficulté de considérer les particularités de cette période dans la mise en place d'exercices d'entraînement

adaptés, ainsi que des évaluations pertinentes, comme nous allons en discuter ci-dessous. Or, il est essentiel d'investir l'adolescence en tant que période d'opportunités liées à une maturation dynamique et un remaniement des aspects neurobiologiques, émotionnels et comportementaux sur lesquels ces interventions peuvent avoir un impact à long terme (Dahl, 2004; Dahl et al., 2018). Cela est d'autant plus pertinent pour la conception d'un programme de méditation qui puisse cibler les capacités de CI chaud, étant donné la sensibilité affective accrue durant cette période (Luciana & Collins, 2012).

En conclusion, nos résultats soutiennent une amélioration des performances de CI à la suite d'un programme de méditation de pleine conscience chez l'enfant. Cette amélioration est observée précisément sur les compétences chaudes. En revanche, nous ne pouvons pas émettre des conclusions concernant l'effet de la méditation sur les compétences d'inhibition froide.

### **1.2.2. L'effet de compensation et l'effet plafond**

Les résultats avancés par nos études soulèvent des questions sur la variabilité des bénéfices de l'entraînement, notamment en ce qui concerne les différences interindividuelles. Effectivement, nous avons pu démontrer au niveau développemental que les individus très performants au départ ont moins bénéficié des interventions cognitives, e.g. les adolescents en comparaison aux enfants (Etude 1). Ces individus pourraient présenter un fonctionnement au niveau déjà optimal, ayant donc moins de marge d'amélioration. Karbach & Unger (2014) expliquent cet effet de compensation en indiquant que la performance cognitive de base est négativement corrélée aux gains de l'entraînement, ce qui permet une réduction des différences d'âge et des différences individuelles après l'intervention. Diverses études axées sur l'entraînement exécutif appuient l'effet compensation, révélant que les gains suscités par l'entraînement ont été plus importants chez les enfants ayant de faibles performances cognitives au pré-test en comparaison à ceux dont la performance était optimale au départ (e.g. Jaeggi et al., 2008; Karbach et al., 2015). Karbach et al. (2017) ont étudié l'effet de compensation et l'effet de magnification chez des enfants, des jeunes adultes et des adultes plus âgés après un entraînement sollicitant le contrôle exécutif. Les résultats ont révélé que

les différences individuelles et les différences d'âge ont été réduites après l'entraînement. De plus, les sujets ayant des capacités plus faibles au départ ont eu des gains plus importants en posttest. Les auteurs soulignent que cet effet est plus marqué dans le groupe expérimental que dans le groupe de contrôle actif, suggérant des gains réels engendrés par l'entraînement exécutif et non des causes annexes, tels que des effets de test-retest. Récemment, une méta-analyse a pu mettre en évidence une association négative entre les compétences cognitives initiales et les gains induits par l'entraînement de ces compétences (Traut et al., 2021). En d'autres termes, plus la performance initiale avant l'entraînement est faible, plus le bénéfice de l'entraînement est important.

Dans nos études, les individus ayant un niveau de CI plus faible au départ (Etude 1) progressent plus après les interventions, i.e. les enfants bénéficient plus que les adolescents à la fois de l'entraînement axé directement sur le CI et la pratique de méditation de pleine conscience sur les capacités d'inhibition froide et chaude, respectivement. De surcroît, les participants présentant des motifs sulcaux associés à une efficacité inhibitrice moindre (Etude 3) semblent compenser cette différence initiale suite à un entraînement qui cible directement les compétences d'inhibition. A nouveau, cela est plus marqué chez les enfants que chez les adolescents. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse de compensation à la suite d'un entraînement exécutif. Cependant, afin de valider cet effet dans nos études, il est capital d'écarter l'hypothèse que l'entraînement et/ou les tâches ont été peu sensibles et peu adaptés pour certains sujets. Or, cela peut être le cas des adolescents en général et des individus ayant des motifs asymétriques du CCA, qui apprendraient plus vite que ceux ayant un motif symétrique. De futures recherches peuvent approfondir cette question en réalisant des analyses au sein du même groupe d'âge avec une intervention ajustée à l'échantillon, ainsi que des tâches plus difficiles qui représentent un défi cognitif satisfaisant.

L'effet de compensation plaide également en faveur d'un entraînement précoce des FE puisque cela pourrait offrir une opportunité de réduire les écarts entre les individus en avantageant notamment les moins favorisés (Diamond & Lee, 2011b). La diminution des disparités sociétales dans le curriculum scolaire nous paraît donc une opportunité à envisager à partir de l'entraînement exécutif, notamment chez les enfants qui s'avèrent particulièrement réceptifs (Diamond & Ling, 2016).

### 1.2.3. Le rôle de la motivation

Tang et al. (2015) indiquent que la méditation ne se réalise pas sans effort lors des premières séances. Le concept d'effort implique la difficulté perçue lors de la poursuite d'un objectif, ainsi que la quantité d'énergie fournie pour l'exécution d'une tâche (Tang et al., 2012). C'est précisément lors des premiers stades de la pratique de méditation chez les sujets naïfs que des efforts importants sont requis pour atteindre et, principalement, maintenir l'état méditatif (Tang et al., 2015; Tang et al., 2012). Le vagabondage de l'esprit, i.e. le *mind-wandering*, y est fréquent. Il est donc logique que la motivation joue un rôle crucial dans la poursuite de ce processus afin que cela devienne plus naturel, moins coûteux, voire plaisant.

Divers facteurs influencent la capacité de s'engager avec succès dans un entraînement cognitif jusqu'à son achèvement, comme les compétences individuelles de départ et la motivation intrinsèque (Jaeggi et al., 2014). Il est donc possible de ne recruter que des participants suffisamment motivés, ainsi que proposer des compensations financières à la fin du projet pour assurer le bon déroulement du protocole (Katz et al., 2014). Comme l'indiquent Capa & Bouquet (2018), les récompenses renforcent la motivation et celle-ci améliore le fonctionnement exécutif.

De surcroît, aménager le design du programme d'entraînement est une option populaire pour stimuler l'engagement du participant. Ces éléments graphiques varient largement dans les études s'adressant à des jeunes. Chez les enfants, les prix, des certificats et l'affichage de résultats élevés tout au long de l'entraînement augmentent la sensation d'efficacité et encouragent les individus à exceller (Jaeggi et al., 2011; Katz et al., 2014). Néanmoins, certains ajouts peuvent avoir un impact négatif sur le progrès, tels que la notation de la performance en temps réel. Cela reflète les conclusions de Katz et al. (2014), qui ont comparé sept versions ludiques d'un entraînement cognitif, en manipulant les caractéristiques à même d'étayer la motivation des participants âgés de 10 ans en moyenne. Les chercheurs signalent que certains éléments peuvent effectivement détourner l'attention de l'entraînement, réduisant les gains subséquents, principalement au stade initial de l'apprentissage. Similairement, Johann et al. (2019) ont comparé à un groupe contrôle les groupes expérimentaux ayant une version standard ou ludique d'un entraînement exécutif chez l'enfant. La version ludique se basait sur un scénario dont le but était d'assurer les

besoins psychologiques soutenant la motivation intrinsèque : le sentiment d'appartenance à un groupe ; l'autonomie des choix et la sensation d'être efficace. Les auteurs ont constaté une amélioration des performances dans les deux groupes expérimentaux par rapport au groupe contrôle. Cependant, les effets de transfert, i.e. l'amélioration des performances de lecture, ont été observés uniquement à la suite des entraînements ludiques. Cette étude nous permet de réfléchir à la place décisive que peut occuper la motivation dans un entraînement au CI via la pratique méditative.

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

### **1.3.1. Méditation guidée sur tablette**

Nous pouvons questionner l'efficacité d'une initiation à la méditation de pleine conscience via tablette numérique en comparaison à une approche plus classique, i.e. des séances prodiguées par un expert. Bien que celle-ci soit conçue et adaptée en fonction des réponses du public, permettant un développement progressif des techniques nécessaires pour s'engager dans la pratique méditative, notre intérêt s'est porté sur l'effet d'une intervention à domicile, plus accessible au public.

Effectivement, l'autonomie des entraînements a été un choix dans notre étude en raison de la commodité d'utilisation et de transport de la tablette tactile. Les participants pouvaient effectuer leurs séances d'entraînement à l'heure, l'endroit et dans le contexte désiré, comme lors des vacances, à condition de respecter les consignes établies. Néanmoins, nous pouvons interroger le caractère optimal des séances de méditation guidée sur tablette pour des personnes naïves à la pratique méditative. Cela est d'autant plus pertinent que les efforts fournis peuvent être conséquents lors des premières séances de méditation.

En général, de nombreuses questions sont soulevées par l'entraînement cognitif à domicile, telles que la rigueur de la pratique et l'environnement non contrôlé (Goghari et al., 2020). Par ailleurs, les différentes heures de passation, parfois non-adaptées à des exercices cognitifs, constituent aussi des variables à même d'influencer l'efficacité de l'entraînement. Des recherches explorant les paramètres du recueil de données en ligne, qui se heurtent à ces



mêmes obstacles, indiquent les difficultés d'imposer le même type d'environnement à tous les participants malgré les recommandations du chercheur (e.g. Brühlmann et al., 2020).

Certes, il est envisageable que cette variabilité influence les effets de l'entraînement. Néanmoins, la littérature signale l'efficacité des programmes de méditation à domicile visant le bien-être chez les populations d'adultes naïfs typiques (Banks et al., 2015) ou atteints d'une pathologie (Wathugala et al., 2019). Bien que ces résultats soient prometteurs, il est important d'évoquer les spécificités de la pratique de méditation à domicile chez les populations plus jeunes. Par exemple, les adolescents sont plus autonomes dans leur entraînement à domicile que les enfants, qui sont sous l'encadrement de leurs parents. Nous pouvons ainsi imaginer que les distractions environnementales et la négligence vis-à-vis de la fréquence de l'entraînement peuvent affecter plus les adolescents que les enfants. Compte tenu de cette possibilité, nous avons conçu un « guide » détaillé (disponible en Annexes 4) pour les lycéens afin de leur expliquer comment garantir une séance de méditation optimale avec les ressources disponibles. Il a été aussi nécessaire de réaliser un entretien préalable avec chaque adolescent afin d'expliquer les points listés dans ce guide. En outre, comme l'expliquent Peer et al. (2022) sur les tests en ligne, des questions de suivi entre les exercices ont eu pour but de maintenir l'éveil des participants durant l'entraînement.

Il est important de noter qu'à la fin du projet, un seul adolescent de notre échantillon n'avait pas été suffisamment assidu et discipliné sur le déroulement du programme de méditation. Il est également important de souligner que les critères de suivi pour un entraînement à domicile sont autant, voire plus stricts que ceux appliqués en laboratoire, comme la correspondance systématique du nombre de séances accomplies sur tablette et celles rapportées sur le journal de bord. Nous avons aussi effectué un accompagnement assidu du protocole par des appels hebdomadaires et des messages réguliers. Cela rejoint les recommandations de Brühlmann et al. (2020) sur les grands recueils de données en ligne, suggérant le repérage systématique des participants négligents et leur subséquente exclusion afin d'avoir des données comportementales plus fines et pertinentes. Du reste, la conclusion générale des études sur l'exactitude des données en ligne soutient leur qualité satisfaisante, notamment par rapport à celles obtenues de manière traditionnelle auprès d'échantillons de convenance (Peer et al., 2022).

Parallèlement, le maintien de la motivation est un critère qui s'impose dans les recherches proposant un entraînement à domicile, comme nous l'avons précédemment

évoqué. Dans notre projet, l'entraînement cognitif ciblant directement le CI et celui de contrôle actif s'adaptait automatiquement au niveau de chaque participant (Jaeggi et al., 2011). De même, chaque exercice de méditation sollicitait des facettes distinctes de la pleine conscience avec une difficulté croissante de mise en œuvre. Or, le rôle de la motivation est particulièrement capital durant l'adolescence. La maturation du système dit motivationnel a lieu pendant cette période (Luciana & Collins, 2012) et s'accompagne d'une sensibilité accrue aux récompenses (Casey et al., 2008, 2011; Constantinidis & Luna, 2019; Steinberg, 2010). Les facteurs motivationnels jouent donc un rôle majeur sur l'efficacité de l'entraînement cognitif chez ce public (Beauchamp et al., 2016, 2019). Beauchamp et al. (2019) ont pu attribuer à un manque de motivation l'absence d'effets comportementaux à la suite de cinq semaines d'entraînement au CI chez les adolescents. Le défi est alors d'élaborer un programme de méditation qui s'adresse à des enfants et des adolescents avec des éléments motivationnels à même de tenir compte de leurs besoins et réponses spécifiques. De futures recherches peuvent proposer deux entraînements qui se distinguent uniquement dans leur présentation, considérant les spécificités de chaque âge tout en gardant un construit comparable. Il serait aussi intéressant d'explorer le lien entre la réceptivité à l'entraînement et la pleine conscience trait, i.e. la tendance à atteindre naturellement un état de pleine conscience. Cela pourrait fournir plus d'éclaircissements sur la faisabilité de la pratique méditative de manière autonome à domicile, ainsi que le son déroulement.

### **1.3.2. Tâches d'entraînement alternatives**

La littérature avance que l'entraînement d'autres fonctions exécutives comme la mémoire de travail (MdT) pourrait influencer l'efficacité du CI (Chein & Morrison, 2010; Kattner, 2021; Klingberg, 2010). L'amélioration de la MdT pourrait ainsi entraîner une amélioration du CI car la MdT implique non seulement l'encodage et le stockage d'éléments, mais aussi l'inhibition d'informations précédemment encodées qui ne sont plus pertinentes (Baddeley, 2012; Diamond, 2013). Ainsi, dans une étude récente à laquelle j'ai participé (Menu et al., 2022), nous avons pu démontrer que les enfants ayant réalisé un entraînement au CI présentent non seulement un transfert proche sur les capacités d'inhibition, mais

également un transfert lointain sur la mise à jour en MdT. Similairement, Aydmune et al. (2019) ont observé des effets de transfert sur une tâche de mémoire de travail visuospatiale après l'entraînement au CI chez les enfants. La réciproque est également vraie, Chein & Morrison (2010) ayant révélé que l'entraînement de quatre semaines à la MdT suscite non seulement un progrès significatif des habiletés en MdT, mais améliore également les performances au Stroop chez les jeunes adultes. Compte tenu de la dynamique complexe entre le CI et la MdT durant le développement (Hartung et al., 2020), l'entraînement de la MdT pourrait induire une amélioration générale des FE (Chein & Morrison, 2010; Klingberg, 2010), impliquant le CI.

Parallèlement, la place du jeu en tant qu'interface d'entraînement cognitif n'est pas négligeable. Comme l'indiquent Green & Bavelier (2008), la pratique répétée d'un jeu d'action a pu augmenter l'acuité visuelle, la sensibilité aux contrastes dans une scène, ainsi que la capacité à identifier un objet cible présenté avec des éléments distrayants, ce qui peut relever des propriétés attentionnelles et d'inhibition (Dye et al., 2009). Similairement, une amélioration des habiletés à inhiber des sources d'interférence a été révélée chez les joueurs d'un jeu vidéo d'action en comparaison à ceux effectuant un jeu de simulation de vie (Green & Bavelier, 2012). De surcroît, Green & Bavelier (2012) soulignent que le véritable effet du jeu vidéo d'action peut être celui d'étayer la capacité à apprendre de nouvelles tâches. Ce mécanisme peut servir de base pour les programmes d'entraînement afin d'inciter les transferts d'apprentissage. Les résultats avancés par Johann et al. (2019) soutiennent cet argument. Comme nous l'avons déjà évoqué, ces auteurs ont observé des effets de transfert d'un entraînement au CI sur la lecture, uniquement dans le groupe ayant effectué la version « jeu » de l'intervention en comparaison à un entraînement classique et au groupe contrôle.

Similairement, Porter et al. (2018) ont testé chez les enfants un entraînement au CI via un jeu basé sur un Go/noGo alimentaire, i.e. les stimuli étant des aliments sains et malsains, à raison de 100% de choix « go » pour les premiers et 100% de choix « no go » pour les derniers. Les résultats ont révélé que les participants ayant effectué cet entraînement ont choisi plus d'aliments sains dans la réalité par rapport aux enfants du groupe témoin non alimentaire. Précisément, les individus ont eu une minute pour sélectionner huit aliments qu'ils apprécieraient manger, la limite de temps encourageant des réponses rapides, peu réfléchies, principalement basées sur la récompense envisagée. Bien que des points méthodologiques soient discutables dans cette étude, e.g. l'absence de mesures de CI avant

l'intervention, cela suggère que le comportement soutenu par le jeu a pu se transférer vers la réalité.

En résumé, divers critères soutiennent l'utilisation d'entraînements cognitifs sous forme ludique. Premièrement, les jeux sont généralement basés sur des appareils portables, e.g. téléphone et tablette, ce qui facilite l'accès des sujets à l'entraînement. De plus, la transformation des entraînements en jeu vidéo semble étayer les effets de transfert. Finalement, l'attrait et la motivation sont plus robustes lorsque l'aspect ludique est assuré (Colzato & Hommel, 2016).

### **1.3.3. Neurofeedback et biofeedback**

Au-delà de l'adaptation des tâches pour optimiser l'entraînement cognitif, d'autres moyens peuvent solliciter et entraîner les compétences exécutives. Par exemple, le neurofeedback est devenu célèbre ces dernières années. Il implique les principes du conditionnement opérant en exigeant des individus le contrôle sur leur activité cérébrale. Dans l'apprentissage par essais et erreurs, les sujets parviennent à réguler leur activité cérébrale dans la direction souhaitée (Baumeister et al., 2018).

Un certain nombre d'études ont pu montrer les effets de l'entraînement par neurofeedback sur l'activation cérébrale, comme la synchronisation des fréquences alpha reflétant l'efficacité du CI (pour une revue récente, voir Viviani & Vallesi, 2021). Dans cette optique, les zones liées à ces interventions comprennent notamment le CCA, le GFI, le cortex préfrontal dorsolatéral et l'insula antérieure (Swick et al., 2011). Ainsi, des recherches utilisant le neurofeedback se sont penchées sur des échantillons cliniques manifestant des déficits de CI liés à des activations amoindries dans ces aires, e.g. le trouble déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) (Bush, 2011). Baumeister et al. (2018) ont conduit un entraînement sur 20 sessions basé sur le neurofeedback en comparaison à une intervention de biofeedback chez des enfants et adolescents (9-14 ans) présentant un TDAH. Cette étude a mis en avant la diminution de la sévérité des symptômes TDAH évalués par les parents, et ce uniquement dans le groupe ayant suivi l'entraînement par neurofeedback. Il est cependant important de souligner que l'activation a augmenté de manière significative dans l'insula antérieure droite lors des réponses inhibitrices réussies pour les deux types d'entraînement.

Au vu de cette conclusion, nous pouvons évoquer également le rôle du biofeedback par cohérence cardiaque en tant que voie alternative d'entraînement exécutif. En détail, le rythme cardiaque est régulé par le système nerveux autonome sous la dépendance des régions corticales et limbiques, en réponse à des demandes internes et externes. Le biofeedback par cohérence cardiaque reflète donc la capacité à moduler le rythme du cœur en altérant la respiration, ce qui affecte conséquemment l'état émotionnel et le fonctionnement cognitif (Dolfus, 2013).

Kim et al. (2013) ont mis en évidence l'association entre la régulation des émotions et l'entraînement par cohérence cardiaque chez les individus souffrant de lésions cérébrales graves. Précisément, cette étude a démontré que l'entraînement à l'autorégulation via le biofeedback par cohérence cardiaque peut améliorer la gestion émotionnelle des patients, ainsi que les capacités d'attention soutenue. En outre, les exercices de cohérence cardiaque semblent recouvrir certains effets induits par la méditation de pleine conscience (Xia et al., 2019 pour revue). Par exemple, van der Zwan et al. (2015) ont révélé une baisse du stress perçu et des symptômes d'anxiété à la fois via le biofeedback par cohérence cardiaque et la pratique de méditation de pleine conscience pendant 5 semaines chez des adultes. Cela suggère que ces exercices sont complémentaires dans un entraînement d'autorégulation, atteignant notamment l'aspect chaud de la cognition.

#### **1.3.4. Posttest différé et effets de transfert**

La question sur la stabilité des gains obtenus après l'entraînement cognitif est critique. En effet, la mise en place d'un posttest différé permettrait de mettre en lumière non seulement la stabilité de l'entraînement reçu, comme les effets secondaires de ce dernier, tels que la motivation et les effets de transfert.

La stabilité des effets induits par la méditation de pleine conscience est une question particulièrement sensible pour les enfants, chez qui nous avons observé un effet important concernant les habiletés de CI chaud (Etude 1). Cela revient à explorer si les interventions précoces basées sur la méditation de pleine conscience sont à même d'affecter le comportement durant la préadolescence, voire adolescence, caractérisées par une

hypersensibilité émotionnelle (Casey et al., 2008; Luna, 2009; Steinberg, 2010). Considérant que l'adolescence est souvent associée à une prise de risque élevée et de mauvaises capacités de prise de décision (Aïte et al., 2018; Chein et al., 2011), il est d'autant plus important de connaître la durabilité des effets de la méditation sur les habiletés exécutives chaudes.

Les effets de transfert constituent la suite naturelle de ce questionnement. La littérature n'est pas unanime (e.g. Karbach et al., 2017; Talanow & Ettinger, 2018) et ce sujet est souvent soumis à des contraintes comme l'âge (Zhao et al., 2018). Néanmoins, diverses études soutiennent le transfert à la suite d'un entraînement au CI, comme le transfert vers des tâches de raisonnement abstrait chez l'enfant d'âge préscolaire (Liu et al., 2015) et le transfert à une tâche de Flanker après un entraînement à la tâche de Simon et un Go/noGo émotionnel chez l'adulte (Millner et al., 2012). Il serait donc essentiel d'évaluer les effets de transfert par le biais des tâches diverses, couvrant à la fois des habiletés plus proches des entraînements effectués (transfert proche), ainsi que les compétences scolaires (transfert lointain), e.g. la lecture et la cognition numérique. Dans le projet APEX, nous disposons d'un nombre suffisamment élevé de tests pour estimer les deux types de transfert, tout en considérant les spécificités de l'âge, i.e. enfants versus adolescents, le niveau de départ, le genre et d'autres paramètres comme le génotype. En utilisant des modèles par équations structurelles (SEM) (Menu et al., 2022), j'ai participé à une étude montrant des effets de transfert entre les différentes FE lors d'un entraînement ciblé du CI. Une même approche pourrait être utilisée pour analyser le transfert après la pratique de la méditation.

Il est aussi nécessaire d'explorer la riche taxonomie du CI afin de mieux connaître les compétences les plus susceptibles de dialoguer avec la pratique méditative. Une méta-analyse récente de Dunning et al. (2022) a révélé que la méditation peut susciter des améliorations légères sur les fonctions exécutives, mais uniquement en comparaison à des groupes témoins passifs. Cela compromet l'idée du transfert général. Au-delà des répercussions sur le bien-être et l'humeur, le transfert de la méditation sur les mesures exécutives est généralement observé dans des échelles autorapportées ou remplies par des proches, comme la BRIEF (e.g. Flook et al., 2010; Lam & Seiden, 2020). Bien que la version parents de la BRIEF soit disponible dans le projet APEX, les mesures ont été obtenues uniquement en pré-test. Nous n'avons donc pas pu estimer le transfert des habiletés acquises dans la pratique méditative par une évaluation des compétences exécutives en situation écologique.

## 1.4. Efficience du CI chez l'enfant et l'adolescent

### 1.4.1. La précision, la pureté et l'adaptabilité des tâches

Une question plus générale émerge sur la précision des mesures utilisées en laboratoire, notamment pour ce qui relève de la sphère socioémotionnelle, comme le Stroop Emotionnel, dont l'objectif est d'estimer les compétences de CI chaud.

La régulation émotionnelle est manifestement liée au fonctionnement exécutif (Carlson & Wang, 2007). Ce processus implique le réseau neuronal et un ensemble de gènes associés aux capacités d'inhibition, ce qui corrobore le rôle du CI dans la gestion émotionnelle (Liu et al., 2020). Selon Saarni (1984), la régulation de l'expérience émotionnelle sous-entend le contrôle des émotions tout en considérant les conventions sociales et les consignes. La version émotionnelle du Stroop vise donc à évaluer la prégnance des stimuli à valence affective, i.e. mots et/ou visages, qui doivent être inhibés afin de produire une réponse pertinente. La question réside alors sur le véritable aspect socio-émotionnel de cette tâche, étant donné l'absence d'éléments sociaux, voire émotionnels, à l'exception des visages qui y figurent.

Il est connu que les sujets généralement mettent plus de temps à identifier les essais incongruents que les congruents dans la tâche de Stroop Emotionnel, ce qui plaide en faveur d'un effet d'interférence équivalent à celui observé dans le Stroop classique (Kappes & Bermeitinger, 2016). Néanmoins, diverses études suggèrent que l'interférence dans cette tâche émotionnelle reflète une surprise générique causée par l'incongruence des stimuli plutôt que des processus intrinsèquement affectifs (Algom et al., 2004; Buhle et al., 2010). Pour contrer cet argument, une étude en IRM a pu révéler un traitement effectif des informations émotionnelles dans cette tâche chez des adolescents ayant des troubles de conduite (Fehlbaum et al., 2018). Plus précisément, ces individus ont présenté une augmentation de l'activité de l'insula antérieure et une faible régulation à la baisse de l'activité de l'amygdale gauche en comparaison à des adolescents typiques, spécifiquement en réponse aux essais incongruents (Fehlbaum et al., 2018).

Bien que le débat reste d'actualité (Smolker et al., 2022), les critiques adressées à cette tâche préconisent l'utilisation de mesures complémentaires à même de refléter les habiletés

de gestion émotionnelle au-delà de la résolution de l'incompatibilité des stimuli (Buhle et al., 2010). Des questionnaires sur les émotions, e.g. l'échelle mesurant les difficultés de régulation émotionnelle, traduite et validée en langue française par Côté et al. (2013). De plus, des tâches comme le paradigme classique de la déception de Saarni (1984) nous renseignent sur l'habileté des enfants de gérer leur déception face à un cadeau décevant, constituant une mesure en direct de la capacité à réguler les ressentis négatifs. De surcroît, Grosbras et al. (2018) ont évalué sous une perspective développementale le traitement des émotions véhiculées par des expressions vocales non linguistiques. Les résultats ont révélé un changement faible mais significatif avec l'âge, caractérisé principalement par la capacité à identifier la colère et la peur. Ainsi, la compréhension de la prosodie affective s'améliore progressivement pendant l'enfance, le niveau optimal étant atteint aux alentours de 15 ans. Cela suggère l'importance d'évaluer le traitement des émotions au-delà de la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles.

Parallèlement, cela nous fournit des pistes pour l'application de tels scénarios en réalité virtuelle. Cet outil a été largement employé dans les protocoles thérapeutiques d'exposition lors des troubles anxieux et des phobies spécifiques, qui relèvent aussi des défis de régulation émotionnelle (Colombo et al., 2021). Il serait donc envisageable d'explorer sur cette plateforme l'évolution des stratégies de régulation émotionnelle à la suite d'interventions expérimentales, comme l'évaluation des stratégies attentionnelles dont fait partie la pleine conscience (Brown & Ryan, 2003; Colombo et al., 2021). Effectivement, les thérapies basées sur la pleine conscience en réalité virtuelle révèle des améliorations durables dans la gestion émotionnelle chez les adultes anxieux en comparaison à un suivi thérapeutique classique (Navarro-Haro et al., 2019), ce qui soutient sa mise en place dans cette plateforme.

Cela nous conduit aux questions portant sur les qualités psychométriques des tâches employées, e.g. la sensibilité et la validité de la mesure, comme nous l'avons évoquée dans nos trois études expérimentales. Il est globalement connu que la mesure doit être suffisamment sensible afin de rendre compte de l'effet de la variation du facteur étudié, tout en considérant les défis imposés par les comparaisons à visée développementale. De ce fait, l'instrument de mesure doit éviter l'effet plancher, i.e. une tâche trop difficile, et l'effet plafond, i.e. une tâche s'avérant trop facile (Nicolas, 2003). Mesurer les habiletés exécutives de manière équitable chez l'enfant et l'adolescent peut donc, d'une part, appuyer le choix



d'une seule tâche pour les deux sous-échantillons, d'autre part étayer l'option des tâches adaptées à chaque public, partageant le même construit.

Par ailleurs, la validité renvoie à la pureté des mesures. Il est capital d'attester que le test mesure réellement ce qu'il prétend mesurer (Nicolas, 2003). Néanmoins, certaines critiques concernant le calcul d'effet sur des tâches comme le Stroop nous interrogent sur la place de variables confondues. Par exemple, Burca et al. (2021) argumentent que l'interférence mesurée par l'effet Stroop relève d'une interférence composite, qui est conditionnée en partie par la récupération de la représentation sémantique du mot écrit. Précisément, il existe un phénomène de facilitation lorsque la couleur désignée par le mot est identique à celle de l'encre, i.e. items congruents (Augustinova et al., 2016). En l'absence d'une condition contrôle pertinente, la différence de moyennes entre les items incongruents et congruents mélangerait donc le phénomène d'interférence et celui de facilitation (Augustinova et al., 2016). Par conséquent, diverses études indiquent que seule l'inclusion d'une condition contrôle sémantique permettrait d'attester de l'inhibition de manière plus précise (Augustinova et al., 2016; Burca et al., 2021, 2022). Cela pourrait influencer également les effets d'âge observés (Burca et al., 2022).

D'autres critères renforcent la précision de la mesure, comme la durée des tâches et l'ordre de passation. Par exemple, dans notre étude portant sur la relation entre le glucose, l'IMC et le CI, l'ordre de réalisation de tâches a pu influencer les résultats observés, notamment si on y ajoute le rôle du stress. Certes, le stress peut être modulé par l'ordre de présentation d'items et des tâches, influençant le coût cognitif perçu par la réalisation des tests (Hambleton et al., 1974). Il serait donc intéressant de contrebalancer la passation afin d'éviter les effets d'ordre qui peuvent fournir des aperçus confondus de la cognition.

#### **1.4.2. Les analyses statistiques**

Les résultats nuancés de nos études mettent en exergue à la fois le besoin d'augmenter la taille de l'échantillon afin d'atteindre une puissance statistique optimale dans les sous-groupes examinés (e.g. Etude 2), ainsi que les enrichir par l'analyse de variables associées, telles que l'estimation de la régulation, plutôt que le niveau statique, de glycémie (Etude 2), ou la prise en compte d'autres sillons jouant un rôle clef dans le réseau d'inhibition, comme

le gyrus frontal inférieur (Etude 3). En outre, le choix de la méthode statistique peut être déterminant pour mettre en lumière des relations complexes entre les variables, notamment dans des cas comme celui de l'entraînement cognitif.

Comme nous l'avons indiqué en Introduction générale, la modélisation d'équations structurelles (*Structural Equation Model, SEM*) permet d'estimer simultanément les relations entre plusieurs variables, dont celles spécifiques qui correspondent à des voies causales hypothétiques (Menu et al., 2022). Parmi les SEM, les modèles à changement latent, *latent change score, LCS*, (Kievit et al., 2018) s'adressent à des données longitudinales en ouvrant une nouvelle voie d'étude des mesures répétées.

En effet, au lieu d'étudier des changements à partir de la différence entre les scores en post et pré-test, les différences entre les mesures successives sont modélisées en tant que facteurs de changement latents. Cela permet notamment d'évaluer très finement les changements de performance en fonction de la valeur de départ. Ces modèles ont été employés pour tester la théorie du mutualisme, selon laquelle les capacités cognitives de base interagissent directement et positivement au cours du développement (Kievit et al., 2017). Autrement dit, les individus ayant des scores plus élevés dans un domaine (e.g. le langage) présentent aussi des gains plus importants dans un autre domaine (e.g. le raisonnement logico-mathématique), et vice-versa (Kievit et al., 2017). De ce fait, ce modèle multivarié peut fournir une perspective hautement dynamique sur la relation entre les facteurs en jeu durant l'entraînement exécutif, au-delà d'une analyse linéaire obtenue avec les méthodes classiques.

Dans une étude SEM à laquelle j'ai participé (Menu et al., 2022, voir Annexes 6), nous avons pu mettre en lumière des effets de transfert lointains chez les enfants à la suite d'un entraînement ciblant le CI, qui n'ont pas été détectés par l'ANOVA classique (Menu et al., 2022). Similairement, chez les adolescents, le modèle à changement latent a repéré des changements significatifs dans les capacités d'inhibition après l'entraînement, ce que l'ANOVA n'a pas pu révéler (Menu et al., 2022). Cela souligne l'importance d'utiliser cette méthode afin d'explorer les effets de la méditation sur les habiletés de CI, notamment chez les adolescents, qui ont peut-être échappé aux analyses classiques effectuées dans cette thèse.

## 1.5. Perspectives

### 1.5.1. Sur le projet APEX

#### 1.5.1.1. Echelles de pleine conscience

Nous disposons d'échelles mesurant la pleine conscience trait dont l'analyse pourrait enrichir les résultats exposés dans cette thèse. Effectivement, la pleine conscience trait implique le CI (Verhaeghen, 2021, pour une méta-analyse). Par exemple, les sous-échelles de non-réactivité et d'observation dans le Five Facets Mindfulness Questionnaire, FFMQ, font écho aux capacités d'inhibition (Noone et al., 2016). L'exploration du lien entre ces échelles, les performances d'inhibition et la réceptivité à l'entraînement cognitif peut fournir des éclaircissements sur la variabilité interindividuelle de notre échantillon. Il serait donc pertinent de confronter ces échelles aux résultats mitigés impliquant la glycémie, l'IMC, ainsi que la morphologie sulcale du CCA.

Il convient de noter que la pratique de la méditation peut susciter le passage d'*état* à *trait* de la pleine conscience (Kiken et al., 2015), c'est-à-dire que la capacité de se focaliser sur les expériences du moment présent pourrait devenir une prédisposition à le faire quotidiennement. Cela suggère des changements durables chez les individus dans leur comportement général, comme moins de vagabondage de l'esprit, une détresse moins importante et plus de recul face aux situations (Kiken et al., 2015; Lilja et al., 2013). Par exemple, la sous-échelle d'observation dans le FFMQ présente une saturation importante chez les personnes habituées à la pratique de méditation de la pleine conscience (e.g. Lilja et al., 2013). Il serait donc intéressant d'évaluer si l'entraînement à la pratique méditative pourrait influencer les scores sur cette sous-échelle, elle-même liée aux habiletés d'inhibition (Noone et al., 2016).

Sur cette ligne de pensée, le Freiburg Mindfulness Inventory (FMI) fournit également des éléments sur les compétences d'inhibition. Par exemple, Doll et al. (2015) ont associé les scores obtenus au FMI à une forte corrélation négative entre l'insula antérieure bilatérale et le précunéus, indiquant une sensibilité accrue au vagabondage de l'esprit chez les individus ayant une prédisposition marquée à la pleine conscience. A son tour, le vagabondage de

l'esprit peut affecter les capacités d'inhibition des réponses (Jana & Aron, 2022). Dans le projet APEX, les données en imagerie permettent d'explorer l'association entre la performance du CI, la pleine conscience trait et le vagabondage de l'esprit, celui-ci étant associé au fonctionnement du réseau du mode par défaut (Zhou & Lei, 2018).

### **1.5.1.2. La place de l'environnement**

Diverses études ont pu démontrer que le statut économique et social (SES) influence les compétences exécutives, e.g. un statut plus élevé est associé à une efficacité cognitive accrue (Hackman et al., 2015). Cet effet peut également perdurer lors du développement, e.g. des disparités liées au SES dans les mesures exécutives précoces peuvent persister chez les enfants jusqu'à l'âge de 5 ans (Ardila et al., 2005; Hackman et al., 2015).

Par ailleurs, l'anatomie et le fonctionnement du cerveau sont également affectés par le contexte culturel (Han & Northoff, 2008). Les demandes variant selon les milieux et les cultures, le développement cérébral présente alors des trajectoires différentes d'élagage et d'organisation (Noble et al., 2015). Précisément, Noble et al. (2015) ont rapporté que les petites différences de revenus étaient associées à des variations relativement importantes de surface corticale chez les enfants issus de familles à faibles revenus. En contrepartie, au sein des familles plus aisées, des différences similaires de revenus ont été associées à des variations plus petites de la surface corticale. Ces variations touchent notamment les régions soutenant le langage, les aptitudes spatiales et les fonctions exécutives (Noble et al., 2015), d'où l'intérêt d'étudier le contexte culturel. Récemment, Tooley et al. (2021) ont associé le statut socioéconomique élevé pendant l'enfance à des réseaux corticaux plus efficaces à l'âge adulte. Cela serait le fruit d'une fenêtre de plasticité plus longue durant le développement cérébral chez les enfants dont l'environnement socioéconomique plus élevé.

Dans le projet APEX, de nombreuses mesures socioéconomiques sont en cours d'homogénéisation, malgré les données manquantes. Au-delà des difficultés pour rassembler ces informations, étant donné le caractère envahissant qui peut leur être attribué, elles constituent une source potentielle pour mieux évaluer les différences interindividuelles rapportées par nos études.

Par exemple, cela peut être notamment enrichissant pour notre étude sur la glycémie sanguine, l'IMC et les performances d'inhibition. Au vu des besoins métaboliques du cerveau (Benton, 2008), il est raisonnable de se pencher sur l'influence de l'alimentation, l'apport de nutriments et la cognition. Il convient de préciser que les habitudes alimentaires dépendent à la fois des revenus et de la culture (e.g. Dixon, 1999). Dans cette optique, Mitchell et al. (2004) ont révélé que les femmes enceintes ayant consommé du poisson, de glucides et de l'acide folique durant la grossesse ont présenté un risque significativement réduit d'avoir un enfant de petite taille pour son âge gestationnel. Cela est d'autant plus important lorsque l'on considère que le poids à la naissance est associé au développement cognitif ultérieur (e.g. Kim et al., 2019). Ce régime aurait donc un effet protecteur dans le développement (Mitchell et al., 2004). Par conséquent, l'inclusion des variables témoignant des aspects socioéconomiques et culturels peut enrichir la compréhension sur la dynamique entre cerveau, cognition et comportement.

#### **1.5.1.3. Journaux de bord**

L'analyse qualitative de la réceptivité à l'entraînement peut être effectuée par l'étude des informations rapportées dans les journaux de bord, telles que le niveau de concentration et de motivation en échelle de Likert de 1 (pas du tout) à 5 (tout à fait). Le taux de tranquillité de l'environnement lors des exercices y figure également, sous la même échelle de notation. De plus, un espace pour décrire librement les ressentis vis-à-vis des séances peut être une source importante de remarques sur le déroulement du programme du point de vue du participant.

Néanmoins, l'analyse de ces données se heurte à de nombreuses difficultés, comme des données manquantes massives et un taux très faible de commentaires. De surcroît, des erreurs de date et des heures approximatives d'entraînement compromettent aussi la bonne qualité de ce recueil.

#### 1.5.1.4. L'analyse génétique

Comme nous l'avons évoqué en Introduction générale, le CI a été étudié à plusieurs niveaux, tels que le niveau neuroanatomique, biologique, comportemental et génétique. Les résultats de cette thèse peuvent donc être enrichis par les données génétiques obtenues auprès d'environ 200 participants, enfants et adolescents.

L'analyse des polymorphismes génétiques du type Single Nucleotide (SNP) s'avère un excellent objet d'étude pour comprendre en quoi la variabilité génétique des gènes impliqués dans le système dopaminergique (COMT, DAT1, DRD1, DRD2) est associée à l'efficacité exécutive et à la réceptivité à l'apprentissage au CI. Des gènes impliqués dans la plasticité cérébrale, comme le BDNF (Söderqvist et al., 2012), peuvent également fournir des éléments importants pour mieux saisir les différentes trajectoires de progrès lors d'un entraînement cognitif.

Dans cette ligne de pensée, Colzato et al. (2014) ont rapporté une flexibilité cognitive accrue chez les individus présentant un génotype homogène Val/Val du gène COMT en comparaison à ceux ayant un génotype hétérogène Met/Val, après avoir joué à un jeu de tirs à la première personne. Autrement dit, les polymorphismes du gène COMT ont modulé les effets de transfert sur la flexibilité cognitive, induits par un jeu de tir à la première personne (Colzato et al., 2014). Cela met en exergue le rôle des prédispositions génétiques dans la capacité à transférer les compétences acquises.

Parallèlement, l'étude des SNP peut se faire à la lumière des interventions basées sur la méditation de pleine conscience. Par exemple, Bakker et al. (2014) ont étudié le rôle des SNP impliqués dans le réseau de la récompense, comme le BDNF et le DRD4, dans le traitement d'affects positifs à la suite d'une thérapie basée sur la pleine conscience. Malgré l'absence de résultats concernant les gènes associés à la dopamine, cette étude contribue à la compréhension des processus modérant la réponse à la pratique de méditation.

Par ailleurs, des études d'association pangénomique (*genome-wide association study*, GWAS) sont à même d'identifier dans le génome de nombreux individus un grand nombre des SNP associés à un large éventail de traits d'intérêt, e.g. des compétences exécutives (Horwitz et al., 2019). Toutefois, la plupart de ces polymorphismes ont un effet faible lorsqu'ils sont analysés séparément, ce qui limite leur pouvoir prédictif (Yang et al., 2010). Pour pallier cette limite, il existe des méthodes intégrant les effets des variantes afin d'en déduire l'héritabilité

et le taux de prédiction des phénotypes à partir des profils génétiques. Par exemple, le score du risque polygénique (*polygenic risk score*, PRS) permet d'estimer la propension génétique à un trait au niveau individuel (Choi et al., 2020). Précisément, le PRS est obtenu en effectuant la somme des allèles de risque qui correspondent au phénotype d'intérêt chez l'individu. Cela est ensuite pondéré par l'estimation de la taille de l'effet la plus importante pour ce phénotype, fournie par la GWAS (Choi et al., 2020).

En utilisant cette méthode, Chang et al. (2020) ont exploré l'association génétique entre les FE et cinq troubles psychiatriques chez une large cohorte d'enfants atteints d'un trouble déficit de l'attention avec hyperactivité (TDAH). Les auteurs se sont basés sur les données de GWAS pour le TDAH, le trouble dépressif majeur, la schizophrénie, le trouble bipolaire et l'autisme pour calculer les PRS. L'analyse factorielle exploratoire a révélé une association importante entre le TDAH, la dépression et le CI, mesuré par un test de Stroop. En détail, le PRS du TDAH et celui de la dépression ont présenté des effets indirects significatifs sur les symptômes du TDAH, médiés par les capacités de CI. Cette conclusion met en exergue la relation entre les gènes de risque et le domaine cognitif de référence, ce qui peut contribuer à élucider davantage la part génétique impliquée dans certains troubles (Chang et al., 2020).

Au-delà de la pathologie, le PRS peut être employé pour étudier les différences individuelles d'efficacité du CI, s'avérant ainsi un bon candidat pour les analyses génétiques du projet APEX. Néanmoins, il est essentiel de considérer la taille restreinte de notre échantillon vis-à-vis des analyses génétiques communément effectuées. De ce fait, le PRS constitue une méthode plutôt utile pour les associations que pour la prédiction de traits, celle-ci nécessitant des échantillons très grands (Dudbridge, 2013).

#### **1.5.1.5. L'imagerie cérébrale**

Nous avons étudié le rôle des contraintes précoces par le biais de la morphologie sulcale du CCA (Cachia et al., 2021a). Néanmoins, d'autres régions potentielles pourraient enrichir ces études, tels que le gyrus frontal inférieur (GFI), une zone jouant un rôle clef dans le réseau d'inhibition (e.g. Aron et al., 2014; Hampshire et al., 2010; Tissier et al., 2018).

En parallèle à la part jouée dans compétences inhibitrices, le GFI est également engagé dans la régulation émotionnelle. En effet, le GFI s'active lors des stratégies de gestion émotionnelle comme la réappréciation (Li et al., 2021), qui est centrée sur la capacité à réinterpréter les situations ayant une charge affective (Gross & John, 2003). Il intègre ainsi un réseau étendu, comprenant le CCA, le cortex préfrontal dorsolatéral, le gyrus temporal, les lobes pariétaux, entre autres (Li et al., 2021). Face à diverses réinterprétations d'ordre affectif, le GFI s'active lorsque l'individu réalise un choix pertinent afin d'atteindre un but donné, ou lorsqu'il est nécessaire d'inhiber les réinterprétations non adaptées à ce but (Braunstein et al., 2017; Morawetz et al., 2016). Plus récemment, Li et al. (2021) ont également conclu que le GFI bilatéral participe à l'utilisation des stratégies de réappréciation au cours de la régulation émotionnelle. Compte tenu de ces arguments, il serait intéressant d'évaluer dans notre projet si la morphologie sulcale de cette région influence à la fois l'efficacité du CI et la réceptivité à l'entraînement aux compétences d'inhibition. Ce sujet s'avère particulièrement prometteur pour la méditation de pleine conscience en raison de ses liens avec la régulation émotionnelle (Armani Kian et al., 2018; Hölzel et al., 2011; Tang et al., 2015).

En rejoignant le but d'une caractérisation multiniveaux du CI à partir de la méditation de pleine conscience, nous nous tournons aussi vers les données d'imagerie fonctionnelle au repos. La littérature avance que la pratique méditative peut entraîner le contrôle exécutif en renforçant les connexions fonctionnelles intrinsèques entre les régions frontopariétales dorsales et ventrales, telles que le GFI, le sillon intrapariétal et le cortex frontal ventrolatéral (Taren et al., 2017). Dans cette optique, l'étude de la connectivité fonctionnelle à l'état de repos représente un moyen robuste pour évaluer les changements dans les connexions interrégionales des zones d'intérêt. Il convient de souligner que diverses recherches ont rapporté des altérations induites par la pratique méditative dans la connectivité fonctionnelle au repos, dont une augmentation du couplage entre le CPF dorsolatéral et les régions engagées dans le réseau du mode par défaut (e.g. Brewer et al., 2011; Creswell et al., 2016). Cela suggère une diminution du vagabondage de l'esprit et une augmentation de la capacité à focaliser l'attention chez les méditants (Brewer et al., 2011). Par conséquent, cela nous paraît un outil optimal pour étudier, du point de vue cérébral, les effets de notre programme de méditation sur les compétences d'inhibition.



Il convient de souligner que les données d'imagerie obtenues dans notre projet offrent un large éventail de possibilités d'études. A l'instar de recherches ayant rapporté des variations de l'activité neuronale associées à des changements au niveau cognitif (e.g. Huang et al., 2019), il est possible d'évaluer les différences dans les patterns d'activation et les performances avant et après les interventions APEX en IRM fonctionnelle. Avec les données d'IRM de diffusion, il est également possible d'explorer les modifications dans la connectivité structurelle des régions comme le CCA (e.g. Tang et al., 2010) et l'insula (e.g. Sharp et al., 2018), qui peuvent être particulièrement affectées par la pratique de méditation de pleine conscience (Tang et al., 2015).

## **1.5.2. Vers l'éducation**

### **1.5.2.1. Attention aux effets indésirables**

Certains auteurs mettent en garde contre les effets négatifs de l'entraînement exécutif et de la méditation de pleine conscience. Pour le premier, l'hypothèse du « déplacement » explique que l'entraînement peut être source d'effets négatifs lorsque les activités remplacées sont en fait plus avantageuses que celles réalisées lors de l'entraînement (Bavelier et al., 2010). Par exemple, un entraînement sur tablette tactile dans les écoles pourrait finir par remplacer une partie du contenu scolaire, ce qui peut s'avérer peu fructueux par la suite. Il nous semble donc crucial que ces entraînements constituent un complément au programme académique et un outil à la portée de l'enseignement plutôt qu'un substitut des apprentissages prévus dans la maquette scolaire.

Le second point évoqué est mis en lumière par les résultats obtenus récemment dans le projet de généralisation de la pratique de pleine conscience en milieu scolaire au Royaume-Uni, i.e. l'étude MYRIAD (Kuyken et al., 2022; Montero-Marín et al., 2022). Effectivement, des effets négatifs de la pratique méditative ont été observés chez les élèves présentant des troubles de l'humeur existants ou émergents, comme les pensées négatives lors des états dépressifs (Montero-Marín et al., 2022). Précisément, la pleine conscience peut renforcer les pensées négatives et la rumination mentale dans ces conditions. De même, des effets négatifs

des thérapies basées sur la pleine conscience avaient été listés par Howard (2016), tels que des épisodes psychotiques, des idées suicidaires et des comportements destructeurs chez les personnes souffrant de problèmes de santé mentale, tout âge compris.

Cela nous impose donc de considérer l'état de santé mentale, l'âge et le stade de développement des individus en tant que prérequis pour la mise en œuvre d'un programme de méditation en milieu scolaire. Nous soulignons également le besoin d'y inclure des experts, comme des psychologues et des thérapeutes, qui puissent à la fois former des enseignants et offrir un cadre suffisamment sécurisé pour les élèves engagés dans la pratique méditative. Ces mesures permettraient d'établir une toile d'écoute plus à même de répondre aux dérives négatives éventuellement causées par l'exercice de la pleine conscience.

#### **1.5.2.2. Réflexions éthiques et épistémologiques**

Une réflexion émerge du sens d'équité au sein de nos sociétés, caractérisées essentiellement par la compétition sociale. L'accès à des entraînements en milieu scolaire qui peuvent augmenter les capacités cognitives réveillent la discussion sur qui bénéficiera de ces interventions. Bien que l'hypothèse d'augmentation des écarts sociétaux et augmentation de la compétition sociale se présente, nous tenons à soutenir la littérature qui affirme que les écarts observés entre les individus tendent à diminuer après l'entraînement cognitif (mécanisme de compensation plutôt que d'amplification). Il convient aussi de souligner que la popularisation des moyens technologiques rend les entraînements cognitifs numériques plus accessibles à un vaste ensemble de la population, et non uniquement aux individus financièrement privilégiés. Cela permet l'accès à tout individu souhaitant explorer et déployer pleinement son potentiel cognitif.

Comme le décrit Roy (2015), l'émergence progressive des habiletés exécutives permet d'entrevoir le développement psychologique de l'enfant, qui doit adapter constamment son comportement selon les contraintes internes et environnementales. Parmi les instances environnementales les plus à même de nous renseigner sur ce développement, la place de l'école est saillante. L'entraînement au CI semble aussi répondre précisément à certaines difficultés rencontrées en milieu scolaire. Par exemple, la littérature montre que le raisonnement et la prise de décision sont parfois biaisés par des heuristiques liées à la pensée

intuitive (Bago et al., 2019; Boissin et al., 2021; De Neys & Pennycook, 2019; Houdé, 2014b; Raelison et al., 2021). Cela a été démontré par le problème de la batte et la balle, dans lequel le prix de ces deux objets est estimé à 1,10 dollars, la batte coûtant 1 dollar de plus que la balle. Interrogés sur le prix de la balle, la plupart des sujets répondent intuitivement « 10 centimes », alors que la bonne réponse, « 5 centimes », peut être obtenue en réalisant une équation très simple. Dans ce contexte, Boissin et al. (2021) ont démontré que l'entraînement cognitif permet l'élaboration de réponses correctes dès le stade intuitif, rendant les intuitions elles-mêmes plus logiques. En milieu scolaire, cela peut susciter une automatisation rapide des opérations algorithmiques sous-jacentes à l'apprentissage logique (Boissin et al., 2021).

Notre attention se tourne aussi vers le rôle de la méditation de pleine conscience à l'école, en tant que pratique détachée d'idéologies religieuses. Les résultats obtenus dans cette thèse suggèrent que les exercices de méditation peuvent offrir une voie douce d'entraînement des capacités d'autorégulation durant l'enfance – sous la condition que cela n'enfreigne pas les principes d'une société laïque. Bien que la littérature demeure mitigée à cet égard (e.g. Drigas & Karyotaki, 2018; Flook et al., 2010; Montero-Marín et al., 2022; Siqueira et al., 2013), les bienfaits présumés de la méditation préconisent des essais ciblant le jeune public, tout en tenant compte des mises en garde précédemment évoquées. En France, des initiatives d'insertion de méditation dans les écoles, telles que « Voltaire et les zamizen » jouissent de popularité auprès des jeunes élèves et invitent dès très tôt les enfants à gérer leurs émotions (Poulhalec, 2017). Le corps enseignant pourrait également bénéficier de ces interventions, de par leur effet rapporté sur les niveaux de stress et d'anxiété chez les enseignants (Sleilaty, 2022). Cet effet global sur le bien-être (Dunning et al., 2022) peut potentiellement améliorer le climat social pour tous les acteurs en milieu scolaire.

## Conclusion générale

---

L'entraînement cognitif s'avère prometteur. Aujourd'hui, il est possible d'entraîner les compétences cognitives par des interventions ciblées et douces, en laboratoire ou plus écologiques, ajustées au besoin de chaque tranche d'âge et à même de répondre aux difficultés préalablement dépistées. Par conséquent, les allers-retours entre le laboratoire et le terrain sont prolifiques, permettant de façonner des outils psychopédagogiques plus adaptés, à visée directement éducative ou fondamentalement cliniques. L'objectif premier de ces recherches est de saisir les processus cognitifs généraux tout en tenant compte des facteurs secondaires à même de les influencer.

Il existe actuellement de nombreux moyens pour exercer les compétences cognitives, comme le jeu vidéo (e.g. Green et al., 2016), le sport (e.g. Hillman et al., 2008, 2019) et les exercices de méditation (e.g. Ly et al., 2014). A l'instar des résultats exposés par Ly et al. (2014) sur un bref programme de méditation via smartphone, il est possible d'utiliser cette plateforme pour accroître l'engagement et la sensation de bien-être quotidien des participants, entraînant également les capacités d'autorégulation. Celle-ci relevant des habiletés exécutives, dont spécifiquement le CI (e.g. Nigg, 2017), l'intérêt pour cette approche s'avère légitime. Cela est d'autant plus pertinent lorsque les gains cognitifs envisagés sont étayés par le fort caractère plastique du cerveau (Karbach et al., 2017), particulièrement durant l'enfance (Heugten et al., 2016) et l'adolescence (Casey et al., 2008).

Néanmoins, divers critères sont à considérer avant de généraliser l'utilisation de ces programmes. Tout d'abord, il est nécessaire de parvenir à optimiser les paramètres de leur utilisation, tels que la durée, la fréquence de la pratique, le support employé, le contenu et la meilleure présentation pour chaque tranche d'âge. De même, il est essentiel de connaître si et comment s'adresser à des compétences spécifiques, e.g. l'inhibition froide et chaude. Il est également important d'identifier les entraînements qui permettent des améliorations durables dans des domaines analogues, e.g. le milieu académique (Karbach & Unger, 2014b). En outre, il est fondamental de prendre en compte les différences interindividuelles, qui façonnent les habiletés exécutives (Kamkar & Morton, 2017; Karr et al., 2018). Ces différences ne sont guère restreintes aux compétences cognitives de départ, mais évoquent une dynamique complexe qui fait part à la fois de facteurs environnementaux, socio-économiques,

culturels, biologiques, génétiques, neuroanatomiques et développementaux. Ainsi, l'entraînement au CI doit s'appuyer sur une caractérisation multi-niveaux afin de s'adresser à tous les niveaux du vivant.

L'ensemble de nos études s'inscrit dans un champ de recherche interdisciplinaire en plein essor, à la croisée des chemins entre les neurosciences et la psychologie. Conservant une perspective éducative, notre but a été d'évaluer les effets d'un entraînement aux compétences d'inhibition chez l'enfant et l'adolescent, notamment par le biais de la méditation de pleine conscience. A l'aide de l'imagerie cérébrale, ainsi que des mesures physiologiques et comportementales, nous avons été à même de déceler les spécificités de chaque entraînement et la part attribuée aux facteurs influençant l'efficacité du CI. La perspective d'améliorer les performances d'inhibition par le biais de la méditation est critique pour les tranches d'âge évaluées. Chez les enfants, la mise en place des programmes visant à développer les compétences requises en milieu scolaire peut être décisive pour leur déploiement ultérieur. Chez les adolescents, une approche adaptée peut cibler la régulation socioémotionnelle afin de contrecarrer les déficits de gestion émotionnelle et les mauvaises capacités de prise de décision communes durant cette période (Aïte et al., 2018; Chein et al., 2011). Nos résultats nous encouragent à approfondir ces points, d'autant plus que la méditation de pleine conscience réserve le potentiel de conduire un entraînement au CI en dehors du cadre expérimental classique. Par conséquent, nous soutenons que la mise en œuvre d'un entraînement au CI via la méditation de pleine conscience peut conduire à un meilleur fonctionnement psychosocial, notamment à des âges précoces.

## Références bibliographiques

---

- Abutalebi, J., Della Rosa, P. A., Green, D. W., Hernandez, M., Scifo, P., Keim, R., Cappa, S. F., & Costa, A. (2012). Bilingualism Tunes the Anterior Cingulate Cortex for Conflict Monitoring. *Cerebral Cortex*, 22(9), 2076-2086. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr287>
- Ac, J., Ao, A., J, D., & H, G. (2020). Feasibility of a school-based mindfulness program for improving inhibitory skills in children with autism spectrum disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103641>
- Accoto, A., Chiarella, S. G., Raffone, A., Montano, A., de Marco, A., Mainiero, F., Rubbino, R., Valzania, A., & Conversi, D. (2021). Beneficial Effects of Mindfulness-Based Stress Reduction Training on the Well-Being of a Female Sample during the First Total Lockdown Due to COVID-19 Pandemic in Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), 5512. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115512>
- Adams, K. M., Gilman, S., Koeppe, R. A., Kluin, K. J., Brunberg, J. A., Dede, D., Berent, S., & Kroll, P. D. (1993). Neuropsychological deficits are correlated with frontal hypometabolism in positron emission tomography studies of older alcoholic patients. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*, 17(2), 205-210. <https://doi.org/10.1111/j.1530-0277.1993.tb00750.x>
- Adan, A., Archer, S. N., Hidalgo, M. P., Di Milia, L., Natale, V., & Randler, C. (2012). Circadian Typology : A Comprehensive Review. *Chronobiology International*, 29(9), 1153-1175. <https://doi.org/10.3109/07420528.2012.719971>
- Adan, A., Natale, V., Caci, H., & Prat, G. (2010). Relationship Between Circadian Typology and Functional and Dysfunctional Impulsivity. *Chronobiology International*, 27(3), 606-619. <https://doi.org/10.3109/07420521003663827>
- Adolphus, K., Lawton, C. L., Champ, C. L., & Dye, L. (2016). The Effects of Breakfast and Breakfast Composition on Cognition in Children and Adolescents : A Systematic Review. *Advances in Nutrition (Bethesda, Md.)*, 7(3), 590S-612S. <https://doi.org/10.3945/an.115.010256>
- Agogué, M., Kazakçı, A., Hatchuel, A., Masson, P. L., Weil, B., Poirel, N., & Cassotti, M. (2014). The impacts of examples on creative design : Explaining fixation and stimulation effects. *Journal of Creative Behavior*, 48(1), 1.
- Agogué, M., Poirel, N., Pineau, A., Houdé, O., & Cassotti, M. (2014). The impact of age and training on creativity : A design-theory approach to study fixation effects. *Thinking Skills and Creativity*, 11, 33-41.
- Agrawal, N., Agrawal, M. K., Kumari, T., & Kumar, S. (2017). *Correlation between Body Mass Index and Blood Glucose Levels in Jharkhand Population*. 4(8), 4.
- Ahr, E., Borst, G., & Houdé, O. (2016). The Learning Brain : Neuronal Recycling and Inhibition. *Zeitschrift Für Psychologie*, 224(4), 277-285. <https://doi.org/10.1027/2151>
- Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.009>
- Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Predominance of lateral over vertical mirror errors in reading : A case for neuronal recycling and inhibition. *Brain and Cognition*, 116, 1-8.
- Aichert, D. S., Wöstmann, N. M., Costa, A., Macare, C., Wenig, J. R., Möller, H.-J., Rubia, K., & Ettinger, U. (2012). Associations between trait impulsivity and prepotent response inhibition. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 34(10), 1016-1032. <https://doi.org/10.1080/13803395.2012.706261>
- Aïte, A., Berthoz, A., Vidal, J., Roëll, M., Zaoui, M., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Taking a Third Person Perspective Requires Inhibitory Control : Evidence From a Developmental Negative Priming Study. *Child Development*, 87(6). <https://doi.org/10.1111/cdev.12558>

- Aïte, A., Cassotti, M., Linzarini, A., Osmont, A., Houdé, O., & Borst, G. (2018). Adolescents' inhibitory control: Keep it cool or lose control. *Developmental Science*, 21(1), 12491. <https://doi.org/10.1111/desc.12491>
- Aïte, A., Houdé, O., & Borst, G. (2018). Stop in the name of lies : The cost of blocking the truth to deceive. *Consciousness and Cognition*, 65, 141.
- Alfimova, M. V., Korovaitseva, G. I., Lezheiko, T. V., & Golimbet, V. E. (2012). Effect of BDNF Val66Met polymorphism on normal variability of executive functions. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 152(5), 606-609. <https://doi.org/10.1007/s10517-012-1587-x>
- Algom, D., Chajut, E., & Lev, S. (2004). A Rational Look at the Emotional Stroop Phenomenon : A Generic Slowdown, Not a Stroop Effect. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(3), 323-338. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.3.323>
- Allan, N. P., Hume, L. E., Allan, D. M., Farrington, A. L., & Lonigan, C. J. (2014). Relations between inhibitory control and the development of academic skills in preschool and kindergarten : A meta-analysis. *Developmental Psychology*, 50(10), 2368-2379. <https://doi.org/10.1037/a0037493>
- Allan, N. P., & Lonigan, C. J. (2014). Exploring Dimensionality of Effortful Control Using Hot and Cool Tasks in a Sample of Preschool Children. *Journal of experimental child psychology*, 122, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.11.013>
- Allman, J. M., Hakeem, A., Erwin, J. M., Nimchinsky, E., & Hof, P. (2006). The Anterior Cingulate Cortex : The Evolution of an Interface between Emotion and Cognition. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 935(1), 107-117. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03476.x>
- Alvarez, J. A., & Emory, E. (2006). Executive Function and the Frontal Lobes : A Meta-Analytic Review. *Neuropsychology Review*, 16(1), 17-42. <https://doi.org/10.1007/s11065-006-9002-x>
- Alves dos Santos, J., & Mallet, L. (2013). The obsessive compulsive disorder. *Médecine sciences : M/S*, 29, 1111-1116. <https://doi.org/10.1051/medsci/20132912014>
- Amiez, C., Wilson, C. R. E., & Procyk, E. (2018). Variations of cingulate sulcal organization and link with cognitive performance. *Scientific Reports*, 8, 13988. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32088-9>
- Amundsen, R., Riby, L. M., Hamilton, C., Hope, M., & McGann, D. (2020). Mindfulness in primary school children as a route to enhanced life satisfaction, positive outlook and effective emotion regulation. *BMC Psychology*, 8(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s40359-020-00428-y>
- Amunts, K., Kedo, O., Kindler, M., Pieperhoff, P., Mohlberg, H., Shah, N. J., Habel, U., Schneider, F., & Zilles, K. (2005). Cytoarchitectonic mapping of the human amygdala, hippocampal region and entorhinal cortex : Intersubject variability and probability maps. *Anatomy and Embryology*, 210(5-6), 343-352. <https://doi.org/10.1007/s00429-005-0025-5>
- Andersen, S. B., Lindgreen, P., Rokkedal, K., & Clausen, L. (2018). Grasping the weight cut-off for anorexia nervosa in children and adolescents. *International Journal of Eating Disorders*, 51(12), 1346-1351. <https://doi.org/10.1002/eat.22977>
- Anderson, A. W., Heptulla, R. A., Driesen, N., Flanagan, D., Goldberg, P. A., Jones, T. W., Rife, F., Sarofin, H., Tamborlane, W., Sherwin, R., & Gore, J. C. (2006). Effects of hypoglycemia on human brain activation measured with fMRI. *Magnetic Resonance Imaging*, 24(6), 693-697. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2006.03.013>
- Anderson, N. D., Lau, M. A., Segal, Z. V., & Bishop, S. R. (2007). Mindfulness-based stress reduction and attentional control. *Clinical Psychology & Psychotherapy*, 14(6), 449-463. <https://doi.org/10.1002/cpp.544>
- Anderson, Y. C., Kirkpatrick, K., Dolan, G. M. S., Wouldes, T. A., Grant, C. C., Cave, T. L., Wild, C. E. K., Derraik, J. G. B., Cutfield, W. S., & Hofman, P. L. (2019). Do changes in weight status affect cognitive function in children and adolescents with obesity? A secondary analysis of a clinical trial. *BMJ Open*, 9(2), e021586. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-021586>
- Antypa, N., Drago, A., & Serretti, A. (2013). The role of COMT gene variants in depression : Bridging neuropsychological, behavioral and clinical phenotypes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(8), 1597-1610. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.006>

- Archer, S. N., Robilliard, D. L., Skene, D. J., Smits, M., Williams, A., Arendt, J., & von Schantz, M. (2003). A length polymorphism in the circadian clock gene *Per3* is linked to delayed sleep phase syndrome and extreme diurnal preference. *Sleep*, *26*(4), 413-415. <https://doi.org/10.1093/sleep/26.4.413>
- Ardila, A., Rosselli, M., Matute, E., & Guajardo, S. (2005). The influence of the parents' educational level on the development of executive functions. *Developmental Neuropsychology*, *28*(1), 539-560. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2801\\_5](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2801_5)
- Ardila, A., Rosselli, M., Matute, E., & Inozemtseva, O. (2011). Gender differences in cognitive development. *Developmental Psychology*, *47*(4), 984-990. <https://doi.org/10.1037/a0023819>
- Arendt, J. (1998). Biological rhythms : The science of chronobiology. *Journal of the Royal College of Physicians of London*, *32*(1), 27-35.
- Armani Kian, A., Vahdani, B., Noorbala, A., Nejatiasafa, A.-A., Arbabi, M., Zenoozian, S., & Nakhjavani, M. (2018). The Impact of Mindfulness-Based Stress Reduction on Emotional Wellbeing and Glycemic Control of Patients with Type 2 Diabetes Mellitus. *Journal of Diabetes Research*, *2018*, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2018/1986820>
- Armstrong, E., Schleicher, A., Omran, H., Curtis, M., & Zilles, K. (1995). The Ontogeny of Human Gyrfication. *Cerebral Cortex*, *5*(1), 56-63. <https://doi.org/10.1093/cercor/5.1.56>
- Arnold, E. (2019). Giving Context Where Context Is Due : Review of Meditation, Buddhism and Science, edited by David McMahan and Erik Braun. *Sophia*, *58*(1), 95-97.
- Aron, A. R. (2007). The Neural Basis of Inhibition in Cognitive Control. *The Neuroscientist*, *13*(3), 214-228. <https://doi.org/10.1177/1073858407299288>
- Aron, A. R. (2011). From reactive to proactive and selective control : Developing a richer model for stopping inappropriate responses. *Biological Psychiatry*, *69*(12), 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.07.024>
- Aron, A. R., Durston, S., Eagle, D. M., Logan, G. D., Stinear, C. M., & Stuphorn, V. (2007). Converging Evidence for a Fronto-Basal-Ganglia Network for Inhibitory Control of Action and Cognition. *Journal of Neuroscience*, *27*(44), 11860-11864. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3644-07.2007>
- Aron, A. R., Fletcher, P. C., Bullmore, E. T., Sahakian, B. J., & Robbins, T. W. (2003). Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans. *Nature Neuroscience*, *6*(2).
- Aron, A. R., Herz, D. M., Brown, P., Forstmann, B. U., & Zaghloul, K. (2016). Frontosubthalamic Circuits for Control of Action and Cognition. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *36*(45), 11489-11495. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2348-16.2016>
- Aron, A. R., & Poldrack, R. A. (2006). Cortical and Subcortical Contributions to Stop Signal Response Inhibition : Role of the Subthalamic Nucleus. *Journal of Neuroscience*, *26*(9), 2424-2433. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4682-05.2006>
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(4), 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.010>
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014a). Inhibition and the right inferior frontal cortex : One decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(4), 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.12.003>
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014b). Right inferior frontal cortex : Addressing the rebuttals. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.00905>
- Åsli, O., Johansen, M. F., & Solhaug, I. (2021). The Effects of Brief Mindfulness Training on Attentional Processes : Mindfulness Increases Prepulse Facilitation but Not Prepulse Inhibition. *Frontiers in Psychology*, *12*, 582057. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.582057>
- 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>



- Augustine, J. R. (1996). Circuitry and functional aspects of the insular lobe in primates including humans. *Brain Research. Brain Research Reviews*, 22(3), 229-244. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(96\)00011-2](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(96)00011-2)
- Augustinova, M., Almeida, E., Clarys, D., Ferrand, L., Izaute, M., Jalenques, I., Juneau, C., Normand, A., & Silvert, L. (2016). Que mesure l'interférence Stroop ? Quand et comment ? Arguments méthodologiques et théoriques en faveur d'un changement de pratiques dans sa mesure. *L'Année psychologique*, 116(01), 45-66. <https://doi.org/10.4074/S000350331500024X>
- Aydmune, Y., Introzzi, I., & Lipina, S. (2019). Inhibitory Processes Training for School-age Children : Transfer Effects. *Developmental Neuropsychology*, 44(7), 513-542. <https://doi.org/10.1080/87565641.2019.1677667>
- Azouvi, P. (2011). Summary. *Developpements*, 9(3), 5-8.
- Baddeley, A. D. (2012). Working Memory : Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63(1), 1-29.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, p. 47-89). <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079742108604521>
- Baer, R. A. (2003). Mindfulness Training as a Clinical Intervention : A Conceptual and Empirical Review. *Clinical Psychology: Science and Practice*, 10(2), 125-143. <https://doi.org/10.1093/clipsy.bpg015>
- Baer, R. A., Smith, G. T., Hopkins, J., Krietemeyer, J., & Toney, L. (2006). Using self-report assessment methods to explore facets of mindfulness. *Assessment*, 13(1), 27-45. <https://doi.org/10.1177/1073191105283504>
- Baer, R., Crane, C., Miller, E., & Kuyken, W. (2019). Doing no harm in mindfulness-based programs : Conceptual issues and empirical findings. *Clinical Psychology Review*, 71, 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2019.01.001>
- Baetu, I., Burns, N. R., Urry, K., Barbante, G. G., & Pitcher, J. B. (2015). Commonly-occurring polymorphisms in the COMT, DRD1 and DRD2 genes influence different aspects of motor sequence learning in humans. *Neurobiology of Learning and Memory*, 125, 176-188. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2015.09.009>
- Bago, B., Raelison, M., & De Neys, W. (2019). Second-guess : Testing the specificity of error detection in the bat-and-ball problem. *Acta Psychologica*, 193, 214-228. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.01.008>
- Bailey, C. E. (2007). Cognitive accuracy and intelligent executive function in the brain and in business. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 122-141. <https://doi.org/10.1196/annals.1412.011>
- Bakker, J. M., Lieveise, R., Menne-Lothmann, C., Viechtbauer, W., Pishva, E., Kenis, G., Geschwind, N., Peeters, F., van Os, J., & Wichers, M. (2014). Therapygenetics in mindfulness-based cognitive therapy : Do genes have an impact on therapy-induced change in real-life positive affective experiences? *Translational Psychiatry*, 4(4), e384. <https://doi.org/10.1038/tp.2014.23>
- Baler, R. D., & Volkow, N. D. (2006). Drug addiction : The neurobiology of disrupted self-control. *Trends in Molecular Medicine*, 12(12), 559-566. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2006.10.005>
- Ballageer, T., Malla, A., Manchanda, R., Takhar, J., & Haricharan, R. (2005). Is Adolescent-Onset First-Episode Psychosis Different From Adult Onset? *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 44(8), 782-789. <https://doi.org/10.1097/01.chi.0000164591.55942.ea>
- Bamne, M. N., Talkowski, M. E., Chowdari, K. V., & Nimgaonkar, V. L. (2010). Functional Analysis of Upstream Common Polymorphisms of the Dopamine Transporter Gene. *Schizophrenia Bulletin*, 36(5), 977-982. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbp005>
- Banich, M. T. (2019). The Stroop Effect Occurs at Multiple Points Along a Cascade of Control : Evidence From Cognitive Neuroscience Approaches. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2019.02164>
- Banich, M. T., & Munakata, Y. (2014). Modes of executive function and their coordination : Introduction to the special section. *Neuropsychologia*, 62, 319-320. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.08.009>

- Banich, M. T., Smolker, H. R., Snyder, H. R., Lewis-Peacock, J. A., Godinez, D. A., Wager, T. D., & Hankin, B. L. (2019). Turning down the heat : Neural mechanisms of cognitive control for inhibiting task-irrelevant emotional information during adolescence. *Neuropsychologia*, *125*, 93-108. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.12.006>
- Banks, J. B., Welhaf, M. S., & Srour, A. (2015). The protective effects of brief mindfulness meditation training. *Consciousness and Cognition*, *33*, 277-285. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.01.016>
- Barch, D. M. (2005). The cognitive neuroscience of schizophrenia. *Annual Review of Psychology*, *1*, 321-353.
- Bari, A., & Robbins, T. W. (2013). Inhibition and impulsivity : Behavioral and neural basis of response control. *Progress in Neurobiology*, *108*, 44-79. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2013.06.005>
- Barinaga, M. (2003). Buddhism and neuroscience. Studying the well-trained mind. *Science (New York, N.Y.)*, *302*(5642), 44-46. <https://doi.org/10.1126/science.302.5642.44>
- Barker, J. E., & Munakata, Y. (2015). Developing Self-Directed Executive Functioning : Recent Findings and Future Directions. *Mind, Brain, and Education*, *9*(2), 92-99.
- Barkley, R. A. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions : Constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, *121*(1), 65-94. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.121.1.65>
- Bartholdy, S., Cheng, J., Schmidt, U., Campbell, I. C., & O'Daly, O. G. (2016). Task-Based and Questionnaire Measures of Inhibitory Control Are Differentially Affected by Acute Food Restriction and by Motivationally Salient Food Stimuli in Healthy Adults. *Frontiers in Psychology*, *7*, 1303. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01303>
- Bartholomew, M. E., Heller, W., & Miller, G. A. (2021). Inhibitory control of emotional processing : Theoretical and empirical considerations. *International Journal of Psychophysiology*, *163*, 5-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.03.015>
- Basso, J. C., McHale, A., Ende, V., Oberlin, D. J., & Suzuki, W. A. (2019). Brief, daily meditation enhances attention, memory, mood, and emotional regulation in non-experienced meditators. *Behavioural Brain Research*, *356*, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2018.08.023>
- Batterink, L., Yokum, S., & Stice, E. (2010). Body mass correlates inversely with inhibitory control in response to food among adolescent girls : An fMRI study. *NeuroImage*, *52*(4), 1696-1703. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.05.059>
- Bauer, C. C. C., Caballero, C., Scherer, E., West, M. R., Mrazek, M. D., Phillips, D. T., Whitfield-Gabrieli, S., & Gabrieli, J. D. E. (2019). Mindfulness training reduces stress and amygdala reactivity to fearful faces in middle-school children. *Behavioral Neuroscience*, *133*(6), 569-585. <https://doi.org/10.1037/bne0000337>
- Bauer, C. C. C., Whitfield-Gabrieli, S., Díaz, J. L., Pasaye, E. H., & Barrios, F. A. (2019). From State-to-Trait Meditation : Reconfiguration of Central Executive and Default Mode Networks. *eNeuro*, *6*(6). <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0335-18.2019>
- Baumeister, S., Wolf, I., Holz, N., Boecker-Schlier, R., Adamo, N., Holtmann, M., Ruf, M., Banaschewski, T., Hohmann, S., & Brandeis, D. (2018). Neurofeedback Training Effects on Inhibitory Brain Activation in ADHD : A Matter of Learning? *Neuroscience*, *378*, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.09.025>
- Bavelier, D., Green, C. S., & Dye, M. W. G. (2010). Children, wired : For better and for worse. *Neuron*, *67*(5), 692-701. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.08.035>
- Beauchamp, K. G., Kahn, L. E., & Berkman, E. T. (2016). Does inhibitory control training transfer? : Behavioral and neural effects on an untrained emotion regulation task. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *11*(9), 1374-1382. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw061>
- Beauchamp, K. G., Shaffer, K. A., Fisher, P. A., & Berkman, E. T. (2019). Brief, computerized inhibitory control training to leverage adolescent neural plasticity : A pilot effectiveness trial. *Applied neuropsychology. Child*, *8*(4), 366-382. <https://doi.org/10.1080/21622965.2018.1495567>

- Beauchemin, J., Hutchins, T. L., & Patterson, F. (2008). Mindfulness meditation may lessen anxiety, promote social skills, and improve academic performance among adolescents with learning difficulties. *Complementary Health Practice Review, 13*, 34-45.
- Bechara, A., Damasio, H., Damasio, A. R., & Lee, G. P. (1999). Different contributions of the human amygdala and ventromedial prefrontal cortex to decision-making. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience, 19*(13), 5473-5481.
- Beck, S. R., Riggs, K. J., & Gorniak, S. L. (2009). Relating developments in children's counterfactual thinking and executive functions. *Thinking & Reasoning, 15*(4), 337-354.
- Bedard, A.-C., Nichols, S., Barbosa, J. A., Schachar, R., Logan, G. D., & Tannock, R. (2002). The development of selective inhibitory control across the life span. *Developmental Neuropsychology, 21*(1), 93-111. [https://doi.org/10.1207/S15326942DN2101\\_5](https://doi.org/10.1207/S15326942DN2101_5)
- Behan, C. (2020). The benefits of meditation and mindfulness practices during times of crisis such as COVID-19. *Irish Journal of Psychological Medicine, 37*(4), 256-258. <https://doi.org/10.1017/ipm.2020.38>
- Bekker, E. M., Kenemans, J. L., & Verbaten, M. N. (2004). Electrophysiological correlates of attention, inhibition, sensitivity and bias in a continuous performance task. *Clinical Neurophysiology, 115*(9), 2001-2013. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.04.008>
- Bell, M. A., & Fox, N. A. (1992). The relations between frontal brain electrical activity and cognitive development during infancy. *Child Development, 63*(5), 1142-1163.
- Bellaj, T., Salhi, I., Le Gall, D., & Roy, A. (2016). Development of executive functioning in school-age Tunisian children. *Child Neuropsychology, 22*(8), 919-954. <https://doi.org/10.1080/09297049.2015.1058349>
- Benau, E. M., Orloff, N. C., Janke, E. A., Serpell, L., & Timko, C. A. (2014). A systematic review of the effects of experimental fasting on cognition. *Appetite, 77*, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2014.02.014>
- Bench, C. J., Frith, C. D., Grasby, P. M., Friston, K. J., Paulesu, E., Frackowiak, R. S., & Dolan, R. J. (1993). Investigations of the functional anatomy of attention using the Stroop test. *Neuropsychologia, 31*(9), 907-922. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(93\)90147-r](https://doi.org/10.1016/0028-3932(93)90147-r)
- Benikos, N., Johnstone, S. J., & Roodenrys, S. J. (2013). Varying task difficulty in the Go/Nogo task : The effects of inhibitory control, arousal, and perceived effort on ERP components. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology, 87*(3), 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.005>
- Benson, J. E., Sabbagh, M. A., Carlson, S. M., & Zelazo, P. D. (2013). Individual differences in executive functioning predict preschoolers' improvement from theory-of-mind training. *Developmental Psychology, 49*(9), 1615-1627. <https://doi.org/10.1037/a0031056>
- Ben-Soussan, T. D., Glicksohn, J., & Berkovich-Ohana, A. (2017). Attentional Effort, Mindfulness, and Altered States of Consciousness Experiences Following Quadrato Motor Training. *Mindfulness, 8*(1), 59-67. <https://doi.org/10.1007/s12671-015-0469-5>
- Benton, D. (2008). The influence of children's diet on their cognition and behavior. *European journal of nutrition, 47 Suppl 3*, 25-37. <https://doi.org/10.1007/s00394-008-3003-x>
- Benton, D., Owens, D. S., & Parker, P. Y. (1994). Blood glucose influences memory and attention in young adults. *Neuropsychologia, 32*(5), 595-607. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)90147-3)
- Benton, D., & Parker, P. Y. (1998). Breakfast, blood glucose, and cognition. *The American Journal of Clinical Nutrition, 67*(4), 772S-778S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/67.4.772S>
- Benzing, V., & Schmidt, M. (2019). The effect of exergaming on executive functions in children with ADHD : A randomized clinical trial. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 29*(8), 1243-1253. <https://doi.org/10.1111/sms.13446>
- Berkman, E. T., Kahn, L. E., & Merchant, J. S. (2014). Training-Induced Changes in Inhibitory Control Network Activity. *Journal of Neuroscience, 34*(1), 149-157. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3564-13.2014>

- Berninger, V., Abbott, R., Cook, C. R., & Nagy, W. (2017). Relationships of Attention and Executive Functions to Oral Language, Reading, and Writing Skills and Systems in Middle Childhood and Early Adolescence. *Journal of Learning Disabilities, 50*(4), 434-449. <https://doi.org/10.1177/0022219415617167>
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A Developmental Perspective on Executive Function. *Child development, 81*(6), 1641-1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Beste, C., Stock, A.-K., Epplen, J. T., & Arning, L. (2016). Dissociable electrophysiological subprocesses during response inhibition are differentially modulated by dopamine D1 and D2 receptors. *European Neuropsychopharmacology: The Journal of the European College of Neuropsychopharmacology, 26*(6), 1029-1036. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2016.03.002>
- Beu, N. D., Burns, N. R., & Baetu, I. (2019). Polymorphisms in dopaminergic genes predict proactive processes of response inhibition. *The European Journal of Neuroscience, 49*(9), 1127-1148. <https://doi.org/10.1111/ejn.14323>
- Bhaijiwala, M., Chevrier, A., & Schachar, R. (2014). Withholding and canceling a response in ADHD adolescents. *Brain and Behavior, 4*(5), 602-614. <https://doi.org/10.1002/brb3.244>
- Bhardwaj, R. D., Curtis, M. A., Spalding, K. L., Buchholz, B. A., Fink, D., Björk-Eriksson, T., Nordborg, C., Gage, F. H., Druid, H., Eriksson, P. S., & Frisén, J. (2006). Neocortical neurogenesis in humans is restricted to development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103*(33), 12564-12568. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605177103>
- Bich, L., Mossio, M., & Soto, A. M. (2020). Glycemia Regulation: From Feedback Loops to Organizational Closure. *Frontiers in Physiology, 11*, 69. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00069>
- Bischoff, J. (2007). *The Effects of Blood Glucose Levels on Cognitive Performance: A Review of the Literature*. 142.
- Bishop, S. R. (2002). What do we really know about mindfulness-based stress reduction? *Psychosomatic Medicine, 64*(1), 71-83. <https://doi.org/10.1097/00006842-200201000-00010>
- Bishop, S. R., Lau, M., Shapiro, S., Carlson, L., Anderson, N. D., & Carmody, J. (2004). Mindfulness: A proposed operational definition. *Clinical Psychology: Science and Practice, 11*, 230-241.
- Bjorklund, D. F., & Harnishfeger, K. K. (1995). The evolution of inhibition mechanisms and their role in human cognition and behavior. In *Interference and inhibition in cognition* (p. 141-173). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012208930-5/50006-4>
- Bjorklund, D., & Kipp, K. (1996). Parental investment theory and gender differences in the evolution of inhibition mechanisms. *Psychological bulletin, 120*, 163-188. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.120.2.163>
- Blackwell, K. A., Chatham, C. H., Wiseheart, M., & Munakata, Y. (2014). A developmental window into trade-offs in executive function: The case of task switching versus response inhibition in 6-year-olds. *Neuropsychologia, 62*, 356-364. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.04.016>
- 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), 112393. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112393>
- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development, 78*(2), 647-663.
- Blakemore, S. J., & Mills, K. L. (2014). Is adolescence a sensitive period for sociocultural processing? *Annu Rev Psychol, 65*, 187-207.

- Blaye, A., & Chevalier, N. (2014). Contrôle exécutif et développement. *Psychologie Française*, 59(1), 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2014.02.003>
- Blöchl, A., & Sirrenberg, C. (1996). Neurotrophins stimulate the release of dopamine from rat mesencephalic neurons via Trk and p75LntR receptors. *The Journal of Biological Chemistry*, 271(35), 21100-21107. <https://doi.org/10.1074/jbc.271.35.21100>
- Bocanegra, B. R., & Hommel, B. (2014). When cognitive control is not adaptive. *Psychological Science*, 25(6), 1249-1255. <https://doi.org/10.1177/0956797614528522>
- Bodhi, B. (2011). What does mindfulness really mean? A canonical perspective. *Contemporary Buddhism*, 12(1), 19-39. <https://doi.org/10.1080/14639947.2011.564813>
- Bodmer, W., & Bonilla, C. (2008). Common and rare variants in multifactorial susceptibility to common diseases. *Nature Genetics*, 40(6), 695-701. <https://doi.org/10.1038/ng.f.136>
- Boendermaker, W. J., Veltkamp, R. C., & Peeters, M. (2017). Training Behavioral Control in Adolescents Using a Serious Game. *Games for Health Journal*, 6(6), 351-357. <https://doi.org/10.1089/g4h.2017.0071>
- Bogels, S., Hoogstad, B., Dun, L., De Shutter, S., & Restifo, K. (2008). Mindfulness training for adolescents with externalising disorders and their parents. *Behavioural and Cognitive Psychotherapy*, 36, 193-209.
- Boissin, E., Caparos, S., Raoulison, M., & Neys, W. de. (2021). From bias to sound intuiting : Boosting correct intuitive reasoning. *Cognition*, 211, 104645. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104645>
- Bondolfi, G., Jermann, F., & Zermatten, A. (2011). Summary. *Psychotherapies*, 31(3), 167-174.
- Borst, G., Ahr, E., Roell, M., & Houdé, O. (2015). The cost of blocking the mirror generalization process in reading : Evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(1), 228-234. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9>
- Borst, G., Aïte, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development : Evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 57, 21-25. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12688>
- Borst, G., Cachia, A., Vidal, J., Simon, G., Fischer, C., Pineau, A., & Houdé, O. (2014). Folding of the anterior cingulate cortex partially explains inhibitory control during childhood : A longitudinal study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 9, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.02.006>
- Borst, G., Simon, G., Vidal, J., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control and visuo-spatial reversibility in Piaget's seminal number conservation task : A high-density ERP study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 920.
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making : Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356-366. <https://doi.org/10.3758/cabn.7.4.356>
- 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.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex : An update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 539-546. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.10.003>
- Boucher, O., Citherlet, D., Ghaziri, J., Hébert-Seropian, B., Siebenthal, Z. V., & Nguyen, D. K. (2017). Insula : Neuropsychology of the fifth lobe of the brain. *Revue de neuropsychologie*, 9(3), 154-161.
- Bouhours, L., Camarda, A., Ernst, M., Osmont, A., Borst, G., & Cassotti, M. (2021a). How does social evaluation influence Hot and Cool inhibitory control in adolescence? *Plos one*, 16(9), 0257753. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257753>
- Bouhours, L., Camarda, A., Ernst, M., Osmont, A., Borst, G., & Cassotti, M. (2021b). How does social evaluation influence Hot and Cool inhibitory control in adolescence? *PLOS ONE*, 16, e0257753. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257753>

- Bourgeois, A., Chelazzi, L., & Vuilleumier, P. (2016). How motivation and reward learning modulate selective attention. In *Progress in Brain Research* (Vol. 229, p. 325-342). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.06.004>
- Bowen, S., Chawla, N., & Marlatt, G. A. (2011). *Mindfulness-based relapse prevention for addictive behaviors : A clinician's guide* (p. xix, 179). Guilford Press.
- Bowers, M. E., Buzzell, G. A., Salo, V., Troller-Renfree, S. V., Hodgkinson, C. A., Goldman, D., Gorodetsky, E., Martin McDermott, J., Henderson, H. A., & Fox, N. A. (2020). Relations between catechol-O-methyltransferase Val158Met genotype and inhibitory control development in childhood. *Developmental Psychobiology*, *62*(2), 181-190. <https://doi.org/10.1002/dev.21901>
- Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, *45*(4), 602-607. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x>
- Braem, S., King, J. A., Korb, F. M., Krebs, R. M., Notebaert, W., & Egner, T. (2017). The role of the anterior cingulate cortex in the affective evaluation of conflict. *Journal of cognitive neuroscience*, *29*(1), 137-149. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01023](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01023)
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, *10*(4), 433-436. <https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
- Brandmeyer, T., & Delorme, A. (2021). Meditation and the Wandering Mind : A Theoretical Framework of Underlying Neurocognitive Mechanisms. *Perspectives on Psychological Science*, *16*(1), 39-66. <https://doi.org/10.1177/1745691620917340>
- Brandmeyer, T., Delorme, A., & Wahbeh, H. (2019). The neuroscience of meditation : Classification, phenomenology, correlates, and mechanisms. *Progress in Brain Research*, *244*, 1-29. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2018.10.020>
- Brault Foisy, L.-M. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics ? *Trends in Neuroscience and Education*, *4*, 26-36.
- Brault Foisy, L.-M., Ahr, E., Masson, S., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d? *Journal of Experimental Child Psychology*, *162*, 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.05.011>
- Braunstein, L. M., Gross, J. J., & Ochsner, K. N. (2017). Explicit and implicit emotion regulation : A multi-level framework. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *12*(10), 1545-1557. <https://doi.org/10.1093/scan/nsx096>
- Braver, T. 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, T. S., Barch, D. M., Gray, J. R., Molfese, D. L., & Snyder, A. (2001). Anterior cingulate cortex and response conflict : Effects of frequency, inhibition and errors. *Cerebral Cortex*, *11*(9), 825-836.
- Braver, T. S., Paxton, J. L., Locke, H. S., & Barch, D. M. (2009). Flexible neural mechanisms of cognitive control within human prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *106*(18), 7351-7356.
- Breehl, L., & Caban, O. (2022). Physiology, Puberty. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK534827/>
- Brefczynski-Lewis, J. A., Lutz, A., Schaefer, H. S., Levinson, D. B., & Davidson, R. J. (2007). Neural correlates of attentional expertise in long-term meditation practitioners. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(27), 11483-11488. <https://doi.org/10.1073/pnas.0606552104>
- Brewer, J. A., Worhunsky, P. D., Gray, J. R., Tang, Y.-Y., Weber, J., & Kober, H. (2011). Meditation experience is associated with differences in default mode network activity and connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(50), 20254-20259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1112029108>
- Brewer, J., Garrison, K., & Whitfield-Gabrieli, S. (2013). What about the "Self" is Processed in the Posterior Cingulate Cortex? *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2013.00647>

- Britton, W. B. (2019). Can Mindfulness Be Too Much of a Good Thing? The Value of a Middle Way. *Current opinion in psychology*, 28, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2018.12.011>
- Britton, W. B., Lindahl, J. R., Cooper, D. J., Canby, N. K., & Palitsky, R. (2021). Defining and measuring meditation-related adverse effects in mindfulness-based programs. *Clinical Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, 9(6), 1185-1204. <https://doi.org/10.1177/2167702621996340>
- Brockett, A. T., Tennyson, S. S., deBettencourt, C. A., Gaye, F., & Roesch, M. R. (2020). Anterior cingulate cortex is necessary for adaptation of action plans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(11), 6196-6204. <https://doi.org/10.1073/pnas.1919303117>
- Brocki, K., Clerkin, S. M., Guise, K. G., Fan, J., & Fossella, J. A. (2009). Assessing the molecular genetics of the development of executive attention in children : Focus on genetic pathways related to the anterior cingulate cortex and dopamine. *Neuroscience*, 164(1), 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.01.029>
- Bronfenbrenner, U., & Ceci, S. J. (1994). Nature-nurture reconceptualized in developmental perspective : A bioecological model. *Psychological Review*, 101(4), 568-586. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.101.4.568>
- Brown, J. W., & Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science (New York, N.Y.)*, 307(5712), 1118-1121. <https://doi.org/10.1126/science.1105783>
- Brown, K. W., & Ryan, R. M. (2003). The benefits of being present : Mindfulness and its role in psychological well-being. *Journal of Personality and Social Psychology*, 84(4), 822-848. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.84.4.822>
- Brown, T. E., & Landgraf, J. M. (2010). Improvements in executive function correlate with enhanced performance and functioning and health-related quality of life : Evidence from 2 large, double-blind, randomized, placebo-controlled trials in ADHD. *Postgraduate Medicine*, 122(5), 42-51. <https://doi.org/10.3810/pgm.2010.09.2200>
- Brühlmann, F., Petralito, S., Aeschbach, L. F., & Opwis, K. (2020). The quality of data collected online : An investigation of careless responding in a crowdsourced sample. *Methods in Psychology*, 2, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.metip.2020.100022>
- 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. *The American Psychologist*, 67(2), 87-100. <https://doi.org/10.1037/a0024657>
- Buchheld, N., Grossman, P., & Walach, H. (2001). Measuring Mindfulness in Insight Meditation (Vipassana) and Meditation-Based Psychotherapy : The Development of the Freiburg Mindfulness Inventory (FMI). *Journal for Meditation and Meditation Research*, 1, 11-34.
- Buckner, R. L., & Carroll, D. C. (2007). Self-projection and the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(2), 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.11.004>
- Buda, M., Fornito, A., Bergström, Z. M., & Simons, J. S. (2011). A Specific Brain Structural Basis for Individual Differences in Reality Monitoring. *The Journal of Neuroscience*, 31(40), 14308-14313. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3595-11.2011>
- Buhle, J., Wager, T., & Smith, E. (2010). Using the Stroop Task to Study Emotion Regulation. In R. Hassin, K. Ochsner, & Y. Trope (Éds.), *Self Control in Society, Mind, and Brain* (p. 0). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195391381.003.0006>
- 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. *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)
- Burca, M., Beaucousin, V., Chausse, P., Ferrand, L., Parris, B. A., & Augustinova, M. (2021). Is There Semantic Conflict in the Stroop Task? *Experimental Psychology*, 68(5), 274-283. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000530>
- Burca, M., Chausse, P., Ferrand, L., Parris, B. A., & Augustinova, M. (2022). Some further clarifications on age-related differences in the Stroop task : New evidence from the two-to-one Stroop

- paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29(2), 492-500. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-02011-x>
- Burke, A., Lam, C. N., Stussman, B., & Yang, H. (2017). Prevalence and patterns of use of mantra, mindfulness and spiritual meditation among adults in the United States. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 17(1), 316. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1827-8>
- Burke, C. A. (2010). Mindfulness-Based Approaches with Children and Adolescents : A Preliminary Review of Current Research in an Emergent Field. *Journal of Child and Family Studies*, 19(2), 133-144. <https://doi.org/10.1007/s10826-009-9282-x>
- Bush, G. (2011). Cingulate, Frontal, and Parietal Cortical Dysfunction in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry*, 69(12), 1160-1167. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2011.01.022>
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(6), 215-222.
- Butterfuss, R., & Kendeou, P. (2018). The Role of Executive Functions in Reading Comprehension. *Educational Psychology Review*, 30(3), 801-826. <https://doi.org/10.1007/s10648-017-9422-6>
- Buxton, R. B., & Frank, L. R. (1997). A Model for the Coupling between Cerebral Blood Flow and Oxygen Metabolism during Neural Stimulation. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 17(1), 64-72. <https://doi.org/10.1097/00004647-199701000-00009>
- Cachia, A., Borst, G., Jardri, R., Raznahan, A., Murray, G. K., Mangin, J.-F., & Plaze, M. (2021a). Towards Deciphering the Fetal Foundation of Normal Cognition and Cognitive Symptoms From Sulcation of the Cortex. *Frontiers in Neuroanatomy*, 15, 712862. <https://doi.org/10.3389/fnana.2021.712862>
- Cachia, A., Borst, G., Jardri, R., Raznahan, A., Murray, G. K., Mangin, J.-F., & Plaze, M. (2021b). Towards Deciphering the Fetal Foundation of Normal Cognition and Cognitive Symptoms From Sulcation of the Cortex. *Frontiers in Neuroanatomy*, 15, 712862. <https://doi.org/10.3389/fnana.2021.712862>
- Cachia, A., Borst, G., Tissier, C., Fisher, C., Plaze, M., Gay, O., & Raznahan, A. (2016). Longitudinal stability of the folding pattern of the anterior cingulate cortex during development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 19, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.02.011>
- Cachia, A., Borst, G., Vidal, J., Fischer, C., Pineau, A., Mangin, J.-F., & Houdé, O. (2014). The Shape of the ACC Contributes to Cognitive Control Efficiency in Preschoolers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(1), 96-106. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00459](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00459)
- Cachia, A., Del Maschio, N., Borst, G., Della Rosa, P. A., Pallier, C., Costa, A., Houdé, O., & Abutalebi, J. (2017). Anterior cingulate cortex sulcation and its differential effects on conflict monitoring in bilinguals and monolinguals. *Brain and Language*, 175, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.09.005>
- Cachia, A., Paillère-Martinot, M.-L., Galinowski, A., Januel, D., de Beaurepaire, R., Bellivier, F., Artiges, E., Andoh, J., Bartrés-Faz, D., Duchesnay, E., Rivièrè, D., Plaze, M., Mangin, J.-F., & Martinot, J.-L. (2008). Cortical folding abnormalities in schizophrenia patients with resistant auditory hallucinations. *NeuroImage*, 39(3), 927-935. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.049>
- Cai, W., George, J. S., Verbruggen, F., Chambers, C. D., & Aron, A. R. (2012). The role of the right presupplementary motor area in stopping action : Two studies with event-related transcranial magnetic stimulation. *Journal of Neurophysiology*, 108(2), 380-389. <https://doi.org/10.1152/jn.00132.2012>
- Cai, W., Ryalí, S., Chen, T., Li, C.-S. R., & Menon, V. (2014). Dissociable roles of right inferior frontal cortex and anterior insula in inhibitory control : Evidence from intrinsic and task-related functional parcellation, connectivity, and response profile analyses across multiple datasets. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 34(44), 14652-14667. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3048-14.2014>



- Cai, Y., Li, S., Liu, J., Li, D., Feng, Z., Wang, Q., Chen, C., & Xue, G. (2016). The Role of the Frontal and Parietal Cortex in Proactive and Reactive Inhibitory Control : A Transcranial Direct Current Stimulation Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(1), 177-186. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00888](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00888)
- Caldas, A. L., Machado-Pinheiro, W., Souza, L. B., Motta-Ribeiro, G. C., & David, I. A. (2012). The Stroop matching task presents conflict at both the response and nonresponse levels : An event-related potential and electromyography study. *Psychophysiology*, 49(9), 1215-1224. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01407.x>
- Camarda, A., Salvia, E., Vidal, J., Poirel, N., Weil, B., Houdé, O., Borst, G., & Cassotti, M. (2018). Neural basis of functional fixedness during creative idea generation : An EEG study. *Neuropsychologia*, 118, 4-12.
- Cameron S. Carter, Matthew M. Botvinick, & Jonathan D. Cohen. (1999). The Contribution of the Anterior Cingulate Cortex to Executive Processes in Cognition. *Reviews in the Neurosciences*, 10(1), 49-58. <https://doi.org/10.1515/REVNEURO.1999.10.1.49>
- Camilleri, G. M., Méjean, C., Bellisle, F., Hercberg, S., & Péneau, S. (2015). Association between Mindfulness and Weight Status in a General Population from the NutriNet-Santé Study. *PLoS ONE*, 10(6), e0127447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127447>
- Campagne, A., & Vercueil, L. (2013). *Chapitre 1. Électroencéphalographie*. Dunod. <http://www.cairn.info/electrophysiologie-de-la-cognition--9782100593064-page-17.htm>
- Camus, Y. (2001). Voies mystiques et religieuses de Chine. *Etudes*, 395(7), 77-90.
- Capa, R. L., & Bouquet, C. A. (2018). Individual Differences in Reward Sensitivity Modulate the Distinctive Effects of Conscious and Unconscious Rewards on Executive Performance. *Frontiers in Psychology*, 9, 148. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00148>
- Cardinale, E. M., Subar, A. R., Brotman, M. A., Leibenluft, E., Kircanski, K., & Pine, D. S. (2019). Inhibitory control and emotion dysregulation : A framework for research on anxiety. *Development and psychopathology*, 31(3), 859-869. <https://doi.org/10.1017/S0954579419000300>
- Cardoso, R., de Souza, E., Camano, L., & Leite, J. R. (2004). Meditation in health : An operational definition. *Brain Research. Brain Research Protocols*, 14(1), 58-60. <https://doi.org/10.1016/j.brainresprot.2004.09.002>
- Carlin, D., Bonerba, J., Phipps, M., Alexander, G., Shapiro, M., & Grafman, J. (2000). Planning impairments in frontal lobe dementia and frontal lobe lesion patients. *Neuropsychologia*, 38(5), 655-665. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00102-5)
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 595-616. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802\\_3](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_3)
- Carlson, S. M., & Wang, T. S. (2007). Inhibitory control and emotion regulation in preschool children. *Cognitive Development*, 22(4), 489-510. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2007.08.002>
- Carmody, J., & Baer, R. A. (2008). Relationships between mindfulness practice and levels of mindfulness, medical and psychological symptoms and well-being in a mindfulness-based stress reduction program. *Journal of Behavioral Medicine*, 31(1), 23-33. <https://doi.org/10.1007/s10865-007-9130-7>
- Carmody, J., Baer, R. A., L B Lykins, E., & Olendzki, N. (2009). An empirical study of the mechanisms of mindfulness in a mindfulness-based stress reduction program. *Journal of Clinical Psychology*, 65(6), 613-626. <https://doi.org/10.1002/jclp.20579>
- Carpenter, J. K., Conroy, K., Gomez, A. F., Curren, L. C., & Hofmann, S. G. (2019). The relationship between trait mindfulness and affective symptoms : A meta-analysis of the Five Facet Mindfulness Questionnaire (FFMQ). *Clinical Psychology Review*, 74, 101785. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2019.101785>
- Carson, J., Carson, K., & Gil, K. (2004). Mindfulness-Based Relationship Enhancement. *Behavior Therapy*, 35, 471-494. [https://doi.org/10.1016/S0005-7894\(04\)80028-5](https://doi.org/10.1016/S0005-7894(04)80028-5)

- Carter, C. S., Macdonald, A. M., Botvinick, M., Ross, L. L., Stenger, V. A., Noll, D., & Cohen, J. D. (2000). Parsing executive processes : Strategic vs. Evaluative functions of the anterior cingulate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(4), 1944-1948.
- Carter, C. S., & Veen, V. (2007). Anterior cingulate cortex and conflict detection : An update of theory and data. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *7*(4), 367-379.
- Cartwright, K. B., Marshall, T. R., Huemer, C. M., & Payne, J. B. (2019). Executive function in the classroom : Cognitive flexibility supports reading fluency for typical readers and teacher-identified low-achieving readers. *Research in Developmental Disabilities*, *88*, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2019.01.011>
- Carver, A. C., Livesey, D. J., & Charles, M. (2001). Age Related Changes in Inhibitory Control as Measured by Stop Signal Task Performance. *International Journal of Neuroscience*, *107*(1-2), 43-61. <https://doi.org/10.3109/00207450109149756>
- Carver, C. S., & Scheier, M. F. (2011). Self-regulation of action and affect. In *Handbook of self-regulation : Research, theory, and applications*, 2nd ed (p. 3-21). Guilford Press.
- Case, R. (1992). The role of the frontal lobes in the regulation of cognitive development. *Brain Cogn*, *20*, 51-73.
- Casey, B. J., Castellanos, F. X., Giedd, J. N., Marsh, W. L., Hamburger, S. D., Schubert, A. B., Vauss, Y. C., Vaituzis, A. C., Dickstein, D. P., Sarfatti, S. E., & Rapoport, J. L. (1997). Implication of Right Frontostriatal Circuitry in Response Inhibition and Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, *36*(3), 374-383. <https://doi.org/10.1097/00004583-199703000-00016>
- Casey, B. J., Galvan, A., & Hare, T. A. (2005). Changes in cerebral functional organization during cognitive development. *Current Opinion in Neurobiology*, *15*(2), 239-244. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.012>
- 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., Jones, R. M., & Hare, T. A. (2008). The Adolescent Brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1124*, 111-126. <https://doi.org/10.1196/annals.1440.010>
- Casey, B. J., Somerville, L. H., Gotlib, I. H., Ayduk, O., Franklin, N. T., Askren, M. K., & Shoda, Y. (2011). Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*(36), 14998-15003. <https://doi.org/10.1073/pnas.1108561108>
- Casey, B. J., Thomas, K. M., Welsh, T. F., Badgaiyan, R. D., Eccard, C. H., Jennings, J. R., & Crone, E. A. (2000). Dissociation of response conflict, attentional selection, and expectancy with functional magnetic resonance imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(15), 8728-8733.
- Casey, B., Tottenham, N., Liston, C., & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain : What have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(3), 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.011>
- Cassotti, M., Agogué, M., Camarda, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving and Idea Generation from Childhood to Adulthood : Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving. *New Directions for Child and Adolescent Development*, *2016*(151), 61-72. <https://doi.org/10.1002/cad.20153>
- Castro-Schilo, L., & Grimm, K. J. (2018). Using residualized change versus difference scores for longitudinal research. *Journal of Social and Personal Relationships*, *35*(1), 32-58. <https://doi.org/10.1177/0265407517718387>
- Cebolla, A., Demarzo, M., Martins, P., Soler, J., & Garcia-Campayo, J. (2017). Unwanted effects : Is there a negative side of meditation? A multicentre survey. *PloS One*, *12*(9), e0183137. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183137>

- Challamel, M.-J., & Franco, P. (2018). Le développement de la rythmicité circadienne : Du fœtus à l'adolescent. *La Presse Médicale*, 47(11, Part 1), 1000-1002. <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2018.10.012>
- Chambers, C. D., Bellgrove, M. A., Stokes, M. G., Henderson, T. R., Garavan, H., Robertson, I. H., & Mattingley, J. B. (2006). Executive "brake failure" following deactivation of human frontal lobe. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(3), 444-455. <https://doi.org/10.1162/089892906775990606>
- Chambers, R., Gullone, E., & Allen, N. B. (2009). Mindful emotion regulation : An integrative review. *Clinical Psychology Review*, 29(6), 560-572. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2009.06.005>
- Chambless, D. L., & Ollendick, T. H. (2001). Empirically supported psychological interventions : Controversies and evidence. *Annual Review of Psychology*, 52, 685-716. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.685>
- Chang, S., Yang, L., Wang, Y., & Faraone, S. V. (2020). Shared polygenic risk for ADHD, executive dysfunction and other psychiatric disorders. *Translational Psychiatry*, 10(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41398-020-00872-9>
- Chase, H. P. (2002). *Understanding Diabetes*. Childrens Diabetes Foundation.
- Chavan, C. F., Mouthon, M., Draganski, B., Zwaag, W., & Spierer, L. (2015). Differential patterns of functional and structural plasticity within and between inferior frontal gyri support training-induced improvements in inhibitory control proficiency : Training-Induced Plasticity in Inhibitory Control. *Human Brain Mapping*, 36(7), 2527-2543. <https://doi.org/10.1002/hbm.22789>
- Chein, J., Albert, D., O'Brien, L., Uckert, K., Steinberg, L., & Dahl, R. E. (2011). Peers increase adolescent risk taking by enhancing activity in the brain's reward circuitry. *Developmental Science*, 14, 1-10.
- Chein, J. M., & Morrison, A. B. (2010). Expanding the mind's workspace : Training and transfer effects with a complex working memory span task. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(2), 193-199. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.2.193>
- Chen, A., Bailey, K., Tiernan, B. N., & West, R. (2011). Neural correlates of stimulus and response interference in a 2-1 mapping stroop task. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 80(2), 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.02.012>
- Chen, J., Lipska, B. K., Halim, N., Ma, Q. D., Matsumoto, M., Melhem, S., Kolachana, B. S., Hyde, T. M., Herman, M. M., & Apud, J. (2004). Functional analysis of genetic variation in catechol-O-methyltransferase (COMT) : Effects on mRNA, protein, and enzyme activity in postmortem human brain. *The American Journal of Human Genetics*, 75(5), 807-821.
- Chen, X., & Deng, X. (2022). Differences in Emotional Conflict Processing between High and Low Mindfulness Adolescents : An ERP Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2891. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052891>
- Chen, Y.-H., Chiu, F.-C., Lin, Y.-N., & Chang, Y.-L. (2021). The Effectiveness of Mindfulness-Based-Stress-Reduction for Military Cadets on Perceived Stress. *Psychological Reports*, 332941211010237. <https://doi.org/10.1177/00332941211010237>
- Cheng, P. C., Hsu, S. R., Tu, S. T., Cheng, Y. C., & Liu, Y. H. (2018). Body mass index influences the plasma glucose concentration during iatrogenic hypoglycemia in people with type 2 diabetes mellitus : A cross-sectional study. *PeerJ*, 6, e4348. <https://doi.org/10.7717/peerj.4348>
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Concepts et développement. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 51(3), 149-163. <https://doi.org/10.1037/a0020031>
- Chevalier, N., James, T. D., Wiebe, S. A., Nelson, J. M., & Espy, K. A. (2014). Contribution of reactive and proactive control to children's working memory performance : Insight from item recall durations in response sequence planning. *Developmental Psychology*, 50(7), 1999-2008. <https://doi.org/10.1037/a0036644>
- Chi, J. G., Dooling, E. C., & Gilles, F. H. (1977). Gyral development of the human brain. *Annals of Neurology*, 1(1), 86-93. <https://doi.org/10.1002/ana.410010109>

- Chiesa, A., Calati, R., & Serretti, A. (2011). Does mindfulness training improve cognitive abilities? A systematic review of neuropsychological findings. *Clinical Psychology Review, 31*(3), 449-464. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2010.11.003>
- Chiesa, A., & Malinowski, P. (2011). Mindfulness-based approaches : Are they all the same? *Journal of Clinical Psychology, 67*(4), 404-424. <https://doi.org/10.1002/jclp.20776>
- Chiesa, A., & Serretti, A. (2009). Mindfulness-Based Stress Reduction for Stress Management in Healthy People : A Review and Meta-Analysis. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine, 15*(5), 593-600. <https://doi.org/10.1089/acm.2008.0495>
- Chikazoe, J. (2010). Localizing performance of go/no-go tasks to prefrontal cortical subregions. *Current Opinion in Psychiatry, 23*(3), 267-272.
- Chiu, Y.-C., & Aron, A. R. (2014). Unconsciously triggered response inhibition requires an executive setting. *Journal of Experimental Psychology. General, 143*(1), 56-61. <https://doi.org/10.1037/a0031497>
- Chmielewski, W. X., Mückschel, M., Dippel, G., & Beste, C. (2016). Concurrent information affects response inhibition processes via the modulation of theta oscillations in cognitive control networks. *Brain Structure and Function, 221*(8), 3949-3961. <https://doi.org/10.1007/s00429-015-1137-1>
- Choi, S., Han, K.-M., Won, E., Yoon, B.-J., Lee, M.-S., & Ham, B.-J. (2015). Association of brain-derived neurotrophic factor DNA methylation and reduced white matter integrity in the anterior corona radiata in major depression. *Journal of Affective Disorders, 172*, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2014.09.042>
- Choi, S. W., Mak, T. S. H., & O'Reilly, P. F. (2020). A guide to performing Polygenic Risk Score analyses. *Nature protocols, 15*(9), 2759-2772. <https://doi.org/10.1038/s41596-020-0353-1>
- Cillessen, L., Johannsen, M., Speckens, A. E. M., & Zachariae, R. (2019). Mindfulness-based interventions for psychological and physical health outcomes in cancer patients and survivors : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Psycho-Oncology, 28*(12), 2257-2269. <https://doi.org/10.1002/pon.5214>
- Cipolotti, L., Spanò, B., Healy, C., Tudor-Sfetea, C., Chan, E., White, M., Biondo, F., Duncan, J., Shallice, T., & Bozzali, M. (2016). Inhibition processes are dissociable and lateralized in human prefrontal cortex. *Neuropsychologia, 93*(Pt A), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.09.018>
- Cirino, P. T., Miciak, J., Ahmed, Y., Barnes, M. A., Taylor, W. P., & Gerst, E. H. (2019). Executive Function : Association with Multiple Reading Skills. *Reading and Writing, 32*(7), 1819-1846. <https://doi.org/10.1007/s11145-018-9923-9>
- Clark, L., Blackwell, A. D., Aron, A. R., Turner, D. C., Dowson, J., Robbins, T. W., & Sahakian, B. J. (2007). Association between response inhibition and working memory in adult ADHD: a link to right frontal cortex pathology? *Biological Psychiatry, 61*(12), 1395-1401. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.07.020>
- Clark, S. V., King, T. Z., & Turner, J. A. (2020). Cerebellar Contributions to Proactive and Reactive Control in the Stop Signal Task : A Systematic Review and Meta-Analysis of Functional Magnetic Resonance Imaging Studies. *Neuropsychology Review*. <https://doi.org/10.1007/s11065-020-09432-w>
- Cohen, B. H. (2013). *Explaining Psychological Statistics*. John Wiley & Sons.
- Collette, F., & Salmon, É. (2014). Fonctionnement exécutif et réseaux cérébraux. *Revue de neuropsychologie, Volume 6*(4), 256-266.
- Colombo, D., Díaz-García, A., Fernandez-Álvarez, J., & Botella, C. (2021). Virtual reality for the enhancement of emotion regulation. *Clinical Psychology & Psychotherapy, 28*(3), 519-537. <https://doi.org/10.1002/cpp.2618>
- Colzato, L., & Hommel, B. (2016). The Future of Cognitive Training. In *Cognitive Training : An Overview of Features and Applications* (p. 201-211). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4_19)
- Colzato, L. S., van den Wildenberg, W. P. M., & Hommel, B. (2014). Cognitive control and the COMT Val<sup>158</sup>Met polymorphism : Genetic modulation of videogame training and transfer to task-

- switching efficiency. *Psychological Research*, 78(5), 670-678. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0514-8>
- Congdon, E., Lesch, K. P., & Canli, T. (2008). Analysis of DRD4 and DAT polymorphisms and behavioral inhibition in healthy adults : Implications for impulsivity. *American Journal of Medical Genetics. Part B, Neuropsychiatric Genetics: The Official Publication of the International Society of Psychiatric Genetics*, 147B(1), 27-32. <https://doi.org/10.1002/ajmg.b.30557>
- Conn, K.-A., Burne, T. H. J., & Kesby, J. P. (2020). Subcortical Dopamine and Cognition in Schizophrenia : Looking Beyond Psychosis in Preclinical Models. *Frontiers in Neuroscience*, 14. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnins.2020.00542>
- Conners, C. K., & Sitarenios, G. (2011). Conners' Continuous Performance Test (CPT). *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology*, 681-683. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3\\_1535](https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3_1535)
- Constantinidis, C., & Luna, B. (2019). Neural Substrates of Inhibitory Control Maturation in Adolescence. *Trends in neurosciences*, 42(9), 604-616. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2019.07.004>
- Cools, R., Sheridan, M., Jacobs, E., & D'Esposito, M. (2007). Impulsive personality predicts dopamine-dependent changes in frontostriatal activity during component processes of working memory. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 27(20), 5506-5514. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0601-07.2007>
- Cooper, S. B., Bandelow, S., Nute, M. L., Morris, J. G., & Nevill, M. E. (2012). Breakfast glycaemic index and cognitive function in adolescent school children. *The British Journal of Nutrition*, 107(12), 1823-1832. <https://doi.org/10.1017/S0007114511005022>
- Corbett, B. A., Constantine, L. J., Hendren, R., Rocke, D., & Ozonoff, S. (2009). Examining executive functioning in children with autism spectrum disorder, attention deficit hyperactivity disorder and typical development. *Psychiatry research*, 166(2-3), 210-222. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2008.02.005>
- Cornish, K. M., Manly, T., Savage, R., Swanson, J., Morisano, D., Butler, N., & Hollis, C. P. (2005). Association of the dopamine transporter (DAT1) 10/10-repeat genotype with ADHD symptoms and response inhibition in a general population sample. *Molecular Psychiatry*, 10(7), 686-698. <https://doi.org/10.1038/sj.mp.4001641>
- Costa, P. T., & McCrae, R. R. (1992). The five-factor model of personality and its relevance to personality disorders. *Journal of Personality Disorders*, 6(4), 343-359. <https://doi.org/10.1521/pedi.1992.6.4.343>
- Côté, G., Gosselin, P., & Dagenais, I. (2013). Évaluation multidimensionnelle de la régulation des émotions : Propriétés psychométriques d'une version francophone du Difficulties in Emotion Regulation Scale. *Journal de Thérapie Comportementale et Cognitive*, 23(2), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.jtcc.2013.01.005>
- Craft, S., Murphy, C., & Wemstrom, J. (1994). Glucose effects on complex memory and nonmemory tasks : The influence of age, sex, and gluco regulatory response. *Psychobiology*, 22(2), 95-105. <https://doi.org/10.3758/BF03327086>
- Crepaldi, M., Colombo, V., Mottura, S., Baldassini, D., Sacco, M., Cancer, A., & Antonietti, A. (2020a). The Use of a Serious Game to Assess Inhibition Mechanisms in Children. *Frontiers in Computer Science*, 2. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fcomp.2020.00034>
- Crepaldi, M., Colombo, V., Mottura, S., Baldassini, D., Sacco, M., Cancer, A., & Antonietti, A. (2020b). Antonyms : A Computer Game to Improve Inhibitory Control of Impulsivity in Children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD). *Information*, 11, 230. <https://doi.org/10.3390/info11040230>
- Crescioni, A., Ehrlinger, J., Alquist, J. L., Conlon, K. E., Baumeister, R. F., Schatschneider, C., & Dutton, G. R. (2011). High trait self-control predicts positive health behaviors and success in weight loss. *Journal of Health Psychology*, 16(5), 750-759. <https://doi.org/10.1177/1359105310390247>
- Creswell, J. D. (2017). Mindfulness Interventions. *Annual Review of Psychology*, 68(1), 491-516. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-042716-051139>

- Creswell, J. D., Taren, A. A., Lindsay, E. K., Greco, C. M., Gianaros, P. J., Fairgrieve, A., Marsland, A. L., Brown, K. W., Way, B. M., Rosen, R. K., & Ferris, J. L. (2016). Alterations in Resting-State Functional Connectivity Link Mindfulness Meditation With Reduced Interleukin-6: A Randomized Controlled Trial. *Biological Psychiatry*, *80*(1), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2016.01.008>
- Criaud, M., & Boulinguez, P. (2013). Have we been asking the right questions when assessing response inhibition in go/no-go tasks with fMRI? A meta-analysis and critical review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(1), 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.11.003>
- Crochiere, R. J., Lansing, A. H., Carracher, A., & Stanger, C. (2019). Executive function and somatic problems in adolescents with above target glycemic control. *Pediatric diabetes*, *20*(1), 119-126. <https://doi.org/10.1111/pedi.12789>
- Csillik, A., & Tafticht, N. (2012). Les effets de la mindfulness et des interventions psychologiques basées sur la pleine conscience. *Pratiques Psychologiques*, *18*(2), 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.prps.2012.02.006>
- Cummins, T. D. R., Hawi, Z., Hocking, J., Strudwick, M., Hester, R., Garavan, H., & Bellgrove, M. A. (2012). Dopamine transporter genotype predicts behavioural and neural measures of response inhibition. *Molecular Psychiatry*, *17*(11), 1086-1092.
- Czapka, S., Schwieter, J. W., & Festman, J. (2022). The influence of peripheral emotions on inhibitory control among children. *Acta Psychologica*, *223*, 103507. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2022.103507>
- Dahl, R. E. (2004). Adolescent brain development: A period of vulnerabilities and opportunities. *Keynote Address. Annals of the New York Academy of Sciences*, *1021*, 1-22. <https://doi.org/10.1196/annals.1308.001>
- Dahl, R. E., Allen, N. B., Wilbrecht, L., & Suleiman, A. B. (2018). Importance of investing in adolescence from a developmental science perspective. *Nature*, *554*(7693), Art. 7693. <https://doi.org/10.1038/nature25770>
- Dash, T., Berroir, P., Joannette, Y., & Ansaldo, A. I. (2019). Alerting, Orienting, and Executive Control: The Effect of Bilingualism and Age on the Subcomponents of Attention. *Frontiers in Neurology*, *10*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fneur.2019.01122>
- 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>
- Davidson, R. J., Kabat-Zinn, J., Schumacher, J., Rosenkranz, M., Muller, D., Santorelli, S. F., Urbanowski, F., Harrington, A., Bonus, K., & Sheridan, J. F. (2003). Alterations in brain and immune function produced by mindfulness meditation. *Psychosomatic Medicine*, *65*(4), 564-570. <https://doi.org/10.1097/01.psy.0000077505.67574.e3>
- Davidson, R. J., & Kaszniak, A. W. (2015). Conceptual and methodological issues in research on mindfulness and meditation. *The American Psychologist*, *70*(7), 581-592. <https://doi.org/10.1037/a0039512>
- Davis, K. M., Lau, M. A., & Cairns, D. R. (2009). Development and Preliminary Validation of a Trait Version of the Toronto Mindfulness Scale. *Journal of Cognitive Psychotherapy*, *23*(3), 185-197. <https://doi.org/10.1891/0889-8391.23.3.185>
- De Bellis, M. D., Keshavan, M. S., Beers, S. R., Hall, J., Frustaci, K., Masalehdan, A., Noll, J., & Boring, A. M. (2001). Sex Differences in Brain Maturation during Childhood and Adolescence. *Cerebral Cortex*, *11*(6), 552-557. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.6.552>
- De Fano, A., Leshem, R., & Ben-Soussan, T. D. (2019). Creating an Internal Environment of Cognitive and Psycho-Emotional Well-Being through an External Movement-Based Environment: An Overview of Quadrato Motor Training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(12), E2160. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122160>
- De Neys, W. (2014). *Conflict detection, dual processes, and logical intuitions: Some clarifications*. Thinking & Reasoning.

- De Neys, W., & Pennycook, G. (2019). Logic, Fast and Slow : Advances in Dual-Process Theorizing. *Current Directions in Psychological Science*, 28(5), 503-509. <https://doi.org/10.1177/0963721419855658>
- De Neys, W., Raelison, M., Boissin, E., Voudouri, A., Bago, B., & Bialek, M. (2020). *MORAL OUTRAGE AND SOCIAL DISTANCING : BAD OR BADLY INFORMED CITIZENS?* [Preprint]. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/j9h76>
- Defoe, I. N., Dubas, J. S., Dalmaijer, E. S., & van Aken, M. A. G. (2020). Is the Peer Presence Effect on Heightened Adolescent Risky Decision-Making only Present in Males? *Journal of Youth and Adolescence*, 49(3), 693-705. <https://doi.org/10.1007/s10964-019-01179-9>
- Del Maschio, N., Sulpizio, S., Fedeli, D., Ramanujan, K., Ding, G., Weekes, B. S., Cachia, A., & Abutalebi, J. (2019). ACC Sulcal Patterns and Their Modulation on Cognitive Control Efficiency Across Lifespan : A Neuroanatomical Study on Bilinguals and Monolinguals. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 29(7), 3091-3101. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy175>
- Delalande, L., Moyon, M., Tissier, C., Dorriere, V., Guillois, B., Mevell, K., Charron, S., Salvia, E., Poirer, N., Vidal, J., Lion, S., Oppenheim, C., Houdé, O., Cachia, A., & Borst, G. (2020). Complex and subtle structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence. *Developmental Science*, 23(4), e12898. <https://doi.org/10.1111/desc.12898>
- Démonet, J.-F., & Planton, S. (2012). Langage et cerveau : Vingt ans d'imagerie fonctionnelle. *Revue française de linguistique appliquée, Vol. XVII(2)*, 9-18.
- Dempster, F. N., & Corkill, A. J. (1999). Individual differences in susceptibility to interference and general cognitive ability. *Acta Psychologica*, 101(2-3), 395-416.
- Denney, N. W. (1984). A model of cognitive development across the life span. *Developmental Review*, 4(2), 171-191. [https://doi.org/10.1016/0273-2297\(84\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0273-2297(84)90006-6)
- Depue, B. E., Olson-Madden, J. H., Smolker, H. R., Rajamani, M., Brenner, L. A., & Banich, M. T. (2014). Reduced Amygdala Volume Is Associated with Deficits in Inhibitory Control : A Voxel- and Surface-Based Morphometric Analysis of Comorbid PTSD/Mild TBI. *BioMed Research International*, 2014, e691505. <https://doi.org/10.1155/2014/691505>
- Depue, R. A., & Collins, P. F. (1999). Neurobiology of the structure of personality : Dopamine, facilitation of incentive motivation, and extraversion. *The Behavioral and Brain Sciences*, 22(3), 491-517; discussion 518-569. <https://doi.org/10.1017/s0140525x99002046>
- Destrieux, C., Fischl, B., Dale, A., & Halgren, E. (2010). Automatic parcellation of human cortical gyri and sulci using standard anatomical nomenclature. *Neuroimage*, 53(1), 1-15.
- Diamond, A. (1991). Neuropsychological insights into the meaning of object concept development. In *The epigenesis of mind : Essays on biology and cognition* (p. 67-110). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Diamond, A. (2002). Normal Development of Prefrontal Cortex from Birth to Young Adulthood : Cognitive Functions, Anatomy, and Biochemistry. In D. T. Stuss & R. T. Knight (Éds.), *Principles of Frontal Lobe Function* (p. 466-503). <http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780195134971.001.0001/acprof-9780195134971-chapter-29>
- Diamond, A. (2005). Attention-deficit disorder (attention-deficit/ hyperactivity disorder without hyperactivity) : A neurobiologically and behaviorally distinct disorder from attention-deficit/hyperactivity disorder (with hyperactivity). *Development and Psychopathology*, 17(3), 807-825. <https://doi.org/10.1017/S0954579405050388>
- Diamond, A. (2006). The early development of executive functions. In *Lifespan Cognition : Mechanisms of change*. University Press.
- Diamond, A. (2011). Biological and social influences on cognitive control processes dependent on prefrontal cortex. In *Progress in Brain Research* (Vol. 189, p. 319-339). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53884-0.00032-4>

- Diamond, A. (2012). Activities and Programs That Improve Children's Executive Functions. *Current directions in psychological science*, 21(5), 335-341. <https://doi.org/10.1177/0963721412453722>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. (2020). Executive functions. *Handbook of Clinical Neurology*, 173, 225-240. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64150-2.00020-4>
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool Program Improves Cognitive Control. *Science*, 318(5855), 1387-1388. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2011.07.011>.
- Diamond, A., Briand, L., Fossella, J., & Gehlbach, L. (2004). Genetic and neurochemical modulation of prefrontal cognitive functions in children. *The American Journal of Psychiatry*, 161(1), 125-132. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.161.1.125>
- Diamond, A., & Goldman-Rakic, P. S. (1989). Comparison of human infants and rhesus monkeys on Piaget's AB task : Evidence for dependence on dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, 74(1), 24-40.
- Diamond, A., Kirkham, N., & Amso, D. (2002). Conditions under which young children can hold two rules in mind and inhibit a prepotent response. *Developmental Psychology*, 38(3), 352-362.
- Diamond, A., Lee, C., Senften, P., Lam, A., & Abbott, D. (2019). Randomized control trial of Tools of the Mind : Marked benefits to kindergarten children and their teachers. *PLOS ONE*, 14(9), e0222447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222447>
- Diamond, A., & Lee, K. (2011a). *Intervention shown to Aid Executive Function Development in Children 4*.
- Diamond, A., & Lee, K. (2011b). 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, 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>
- Dias, J. P., Joseph, J. J., Kluwe, B., Zhao, S., Shardell, M., Seeman, T., Needham, B. L., Wand, G. S., Kline, D., Brock, G., Castro-Diehl, C., & Golden, S. H. (2020). The longitudinal association of changes in diurnal cortisol features with fasting glucose : MESA. *Psychoneuroendocrinology*, 119, 104698. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2020.104698>
- Dijk, D.-J., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (1992). Circadian and sleep/wake dependent aspects of subjective alertness and cognitive performance. *Journal of Sleep Research*, 1(2), 112-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.1992.tb00021.x>
- Dincheva, I., Glatt, C. E., & Lee, F. S. (2012). Impact of the BDNF Val66Met Polymorphism on Cognition : Implications for Behavioral Genetics. *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 18(5), 439-451. <https://doi.org/10.1177/1073858411431646>
- Dixon, J. (1999). A cultural economy model for studying food systems. *Agriculture and Human Values*, 16(2), 151-160. <https://doi.org/10.1023/A:1007531129846>
- Dobkin, P. L., Irving, J. A., & Amar, S. (2012). For Whom May Participation in a Mindfulness-Based Stress Reduction Program be Contraindicated? *Mindfulness*, 3(1), 44-50. <https://doi.org/10.1007/s12671-011-0079-9>
- Dolfus, S. (2013). La cohérence cardiaque : Définition, intérêts et applications en psychiatrie. *European Psychiatry*, 28(S2), 13-13. <https://doi.org/10.1016/j.eurpsy.2013.09.031>
- Doll, A., Hölzel, B. K., Boucard, C. C., Wohlschläger, A. M., & Sorg, C. (2015). Mindfulness is associated with intrinsic functional connectivity between default mode and salience networks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 461. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00461>
- Doll, J. J., Eslami, Z., & Walters, L. (2013). Understanding Why Students Drop Out of High School, According to Their Own Reports : Are They Pushed or Pulled, or Do They Fall Out? A



- Comparative Analysis of Seven Nationally Representative Studies. *SAGE Open*, 3(4), 2158244013503834. <https://doi.org/10.1177/2158244013503834>
- Dovis, S., Oord, S., Wiers, R. W., & Prins, P. J. M. (2015). Improving executive functioning in children with ADHD: training multiple executive functions within the context of a computer game. A randomized double-blind placebo controlled trial. *PLoS One*, 10(4), 0121651. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121651>
- 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)
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity : Changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427(6972), 311.
- Draperi, M., Aïte, A., Cassotti, M., Le Stanc, L., Houdé, O., & Borst, G. (2022). Development of cool and hot theory of mind and cool and hot inhibitory control abilities from 3.5 to 6.5 years of age. *PLoS ONE*, 17(1), 0262251.
- Dreisbach, G., & Fischer, R. (2015). Conflicts as Aversive Signals for Control Adaptation. *Current Directions in Psychological Science*, 24(4), 255-260.
- Dreyfus, G. (2011). Is mindfulness present-centred and non-judgmental? A discussion of the cognitive dimensions of mindfulness. *Contemporary Buddhism*, 12(1), 41-54. <https://doi.org/10.1080/14639947.2011.564815>
- Drigas, A., & Karyotaki, M. (2018). Mindfulness Training & Assessment and Intelligence. *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (IJES)*, 6, 70. <https://doi.org/10.3991/ijes.v6i3.9248>
- Dubertret, C., Bardel, C., Ramoz, N., Martin, P.-M., Deybach, J.-C., Adès, J., Gorwood, P., & Gouya, L. (2010). A genetic schizophrenia-susceptibility region located between the ANKK1 and DRD2 genes. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry*, 34(3), 492-499. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2010.02.003>
- Duchesne, M., Mattos, P., Appolinário, J. C., de Freitas, S. R., Coutinho, G., Santos, C., & Coutinho, W. (2010). Assessment of executive functions in obese individuals with binge eating disorder. *Revista Brasileira De Psiquiatria (Sao Paulo, Brazil: 1999)*, 32(4), 381-388. <https://doi.org/10.1590/s1516-44462010000400011>
- Dudbridge, F. (2013). Power and Predictive Accuracy of Polygenic Risk Scores. *PLoS Genetics*, 9(3), e1003348. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1003348>
- Dumontheil, I., Houlton, R., Christoff, K., & Blakemore, S.-J. (2010). Development of relational reasoning during adolescence. *Developmental Science*, 13(6), F15-24. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01014.x>
- Duncan, J., Seitz, R. J., Kolodny, J., Bor, D., Herzog, H., Ahmed, A., Newell, F. N., & Emslie, H. (2000). A neural basis for general intelligence. *Science (New York, N.Y.)*, 289(5478), 457-460. <https://doi.org/10.1126/science.289.5478.457>
- Dunne, J. D., Thompson, E., & Schooler, J. (2019). Mindful meta-awareness : Sustained and non-propositional. *Current Opinion in Psychology*, 28, 307-311. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.07.003>
- Dunning, D. L., Griffiths, K., Kuyken, W., Crane, C., Foulkes, L., Parker, J., & Dalgleish, T. (2019a). Research Review : The effects of mindfulness-based interventions on cognition and mental health in children and adolescents – a meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(3), 244-258. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12980>
- Dunning, D. L., Griffiths, K., Kuyken, W., Crane, C., Foulkes, L., Parker, J., & Dalgleish, T. (2019b). Research Review : The effects of mindfulness-based interventions on cognition and mental health in children and adolescents – a meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 60(3), 244-258. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12980>
- Dunning, D., Tudor, K., Radley, L., Dalrymple, N., Funk, J., Vainre, M., Ford, T., Montero-Marín, J., Kuyken, W., & Dalgleish, T. (2022). Do mindfulness-based programmes improve the cognitive

- skills, behaviour and mental health of children and adolescents? An updated meta-analysis of randomised controlled trials. *Evidence-Based Mental Health*, 25(3), 135-142. <https://doi.org/10.1136/ebmental-2022-300464>
- Durstun, S., Thomas, K. M., Yang, Y., Uluğ, A. M., Zimmerman, R. D., & Casey, B. J. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5(4), 9-16.
- Dye, M. W. G., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009). Increasing Speed of Processing With Action Video Games. *Current Directions in Psychological Science*, 18(6), 321-326. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01660.x>
- Ebitz, R. B., & Hayden, B. Y. (2016). Dorsal anterior cingulate : A Rorschach test for cognitive neuroscience. *Nature Neuroscience*, 19(10), Art. 10. <https://doi.org/10.1038/nn.4387>
- Egan, M. F., Goldberg, T. E., Kolachana, B. S., Callicott, J. H., Mazzanti, C. M., Straub, R. E., & Weinberger, D. R. (2001). Effect of COMT Val108/158 Met genotype on frontal lobe function and risk for schizophrenia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(12), 6917-6922. <https://doi.org/10.1073/pnas.111134598>
- Egan, M. F., Kojima, M., Callicott, J. H., Goldberg, T. E., Kolachana, B. S., Bertolino, A., Zaitsev, E., Gold, B., Goldman, D., Dean, M., Lu, B., & Weinberger, D. R. (2003). The BDNF val66met polymorphism affects activity-dependent secretion of BDNF and human memory and hippocampal function. *Cell*, 112(2), 257-269. [https://doi.org/10.1016/s0092-8674\(03\)00035-7](https://doi.org/10.1016/s0092-8674(03)00035-7)
- Eichele, T., Debener, S., Calhoun, V. D., Specht, K., Engel, A. K., Hugdahl, K., von Cramon, D. Y., & Ullsperger, M. (2008). Prediction of human errors by maladaptive changes in event-related brain networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(16), 6173-6178. <https://doi.org/10.1073/pnas.0708965105>
- Eisenberg, D. P., & Berman, K. F. (2010). Executive function, neural circuitry, and genetic mechanisms in schizophrenia. *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 35(1), 258-277. <https://doi.org/10.1038/npp.2009.111>
- Emavardhana, T., & Tori, C. D. (1997). Changes in Self-Concept, Ego Defense Mechanisms, and Religiosity Following Seven-Day Vipassana Meditation Retreats. *Journal for the Scientific Study of Religion*, 36(2), 194-206. <https://doi.org/10.2307/1387552>
- Enge, S., Fleischhauer, M., Gärtner, A., Reif, A., Lesch, K.-P., Kliegel, M., & Strobel, A. (2016). Brain-Derived Neurotrophic Factor (Val66Met) and Serotonin Transporter (5-HTTLPR) Polymorphisms Modulate Plasticity in Inhibitory Control Performance Over Time but Independent of Inhibitory Control Training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00370>
- Engelhardt, L. E., Harden, K. P., Tucker-Drob, E. M., & Church, J. A. (2019). The neural architecture of executive functions is established by middle childhood. *NeuroImage*, 479-489.
- Erika-Florence, M., Leech, R., & Hampshire, A. (2014). A functional network perspective on response inhibition and attentional control. *Nature Communications*, 5(1), 4073. <https://doi.org/10.1038/ncomms5073>
- Eriksen, B., & Eriksen, C. (1974). Effect of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1), 143-149.
- Erisman, S. M., & Roemer, L. (2012). A Preliminary Investigation of the Process of Mindfulness. *Mindfulness*, 3(1), 30-43. <https://doi.org/10.1007/s12671-011-0078-x>
- Ernst, M., Benson, B., Artiges, E., Gorka, A. X., Lemaitre, H., Lago, T., & Martinot, J.-L. (2019). Pubertal maturation and sex effects on the default-mode network connectivity implicated in mood dysregulation. *Translational Psychiatry*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41398-019-0433-6>
- Ernst, M., & Fudge, J. L. (2009). A developmental neurobiological model of motivated behavior : Anatomy, connectivity and ontogeny of the triadic nodes. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 33(3), 367-382. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.10.009>
- Ernst, M., Pine, D. S., & Hardin, M. (2006). Triadic model of the neurobiology of motivated behavior in adolescence. *Psychological Medicine*, 36(3), 299-312. <https://doi.org/10.1017/S0033291705005891>

- Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A., & Senn, T. E. (2004). The contribution of executive functions to emergent mathematic skills in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, *26*(1), 465-486.
- Ethridge, L. E., Soilleux, M., Nakonezny, P. A., Reilly, J. L., Hill, S. K., Keefe, R. S., Gershon, E. S., Pearlson, G. D., Tamminga, C. A., Keshavan, M. S., & Sweeney, J. A. (2014). Behavioral response inhibition in psychotic disorders : Diagnostic specificity, familiarity and relation to generalized cognitive deficit. *Schizophrenia Research*, *159*(2-3), 491-498. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2014.08.025>
- Etkin, A., Egner, T., & Kalisch, R. (2011). Emotional processing in anterior cingulate and medial prefrontal cortex. *Trends in cognitive sciences*, *15*(2), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.11.004>
- Evans, J. S. B. T. (2003). In two minds : Dual-process accounts of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(10), 454-459. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.08.012>
- Evans, M. L., Pernet, A., Lomas, J., Jones, J., & Amiel, S. A. (2000). Delay in onset of awareness of acute hypoglycemia and of restoration of cognitive performance during recovery. *Diabetes Care*, *23*(7), 893-897. <https://doi.org/10.2337/diacare.23.7.893>
- Ezzat, H., Agogu e, M., Le Masson, P., Weil, B., & Cassotti, M. (2019). Specificity and Abstraction of Examples : Opposite Effects on Fixation for Creative Ideation. *The Journal of Creative Behavior*, *55*(1), 115-122.
- Fahmy, R., Wasfi, M., Mamdouh, R., Moussa, K., Wahba, A., Wittemann, M., Hirjak, D., Kubera, K. M., Wolf, N. D., Sambataro, F., & Wolf, R. C. (2018). Mindfulness-based interventions modulate structural network strength in patients with opioid dependence. *Addictive Behaviors*, *82*, 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.addbeh.2018.02.013>
- Fairchild, G., Goozen, S. H. M., Stollery, S. J., Aitken, M. R. F., Savage, J., Moore, S. C., & Goodyer, I. M. (2009). Decision making and executive function in male adolescents with early-onset or adolescence-onset conduct disorder and control subjects. *Biological Psychiatry*, *66*(2), 162-168. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.02.024>
- Fairclough, S. H., & Houston, K. (2004). A metabolic measure of mental effort. *Biological Psychology*, *66*(2), 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2003.10.001>
- Fall, E. (2016). *Introduction*. Dunod. <http://www.cairn.info/introduction-a-la-pleine-conscience--9782100740222-page-1.htm>
- Fallon, S. J., Muhammed, K., Drew, D. S., Ang, Y.-S., Manohar, S. G., & Husain, M. (2019). Dopamine guides competition for cognitive control : Common effects of haloperidol on working memory and response conflict. *Cortex*, *113*, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.11.031>
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(3), 340-347. <https://doi.org/10.1162/089892902317361886>
- Fan, Y., Tang, Y.-Y., Tang, R., & Posner, M. I. (2014). Short Term Integrative Meditation Improves Resting Alpha Activity and Stroop Performance. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, *39*(3-4), 213-217. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9258-5>
- Farahani, F. V., Karwowski, W., D'Esposito, M., Betzel, R. F., Douglas, P. K., Sobczak, A. M., Bohaterewicz, B., Marek, T., & Fafrowicz, M. (2022). Diurnal variations of resting-state fMRI data : A graph-based analysis. *NeuroImage*, *256*, 119246. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119246>
- Faraji, M., Talepasand, S., & Boogar, I. R. (2019). Effectiveness of mindfulness-based cognitive therapy for child on bullying behaviors among children. *International Archives of Health Sciences*, *6*(1), 52. [https://doi.org/10.4103/iahs.iahs\\_54\\_18](https://doi.org/10.4103/iahs.iahs_54_18)
- Faraone, S. V., Wilens, T. E., Petty, C., Antshel, K., Spencer, T., & Biederman, J. (2007). Substance use among ADHD adults : Implications of late onset and subthreshold diagnoses. *The American Journal on Addictions*, *16* Suppl 1, 24-32; quiz 33-34. <https://doi.org/10.1080/10550490601082767>

- Farb, N. A., Anderson, A. K., Irving, J. A., & Segal, Z. V. (2014). *Mindfulness interventions and emotion regulation*.
- Farb, N. A. S., Segal, Z. V., & Anderson, A. K. (2013). Mindfulness meditation training alters cortical representations of interoceptive attention. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *8*(1), 15-26. <https://doi.org/10.1093/scan/nss066>
- Farb, N. A. S., Segal, Z. V., Mayberg, H., Bean, J., McKeon, D., Fatima, Z., & Anderson, A. K. (2007). Attending to the present : Mindfulness meditation reveals distinct neural modes of self-reference. *Social cognitive and affective neuroscience*, *2*(4), 313-322. <https://doi.org/10.1093/scan/nsm030>
- Farias, M., Maraldi, E., Wallenkampf, K. C., & Lucchetti, G. (2020). Adverse events in meditation practices and meditation-based therapies : A systematic review. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, *142*(5), 374-393. <https://doi.org/10.1111/acps.13225>
- Farias, M., & Wikholm, C. (2016). Has the science of mindfulness lost its mind? *BJPsych Bulletin*, *40*(6), 329-332. <https://doi.org/10.1192/pb.bp.116.053686>
- Favre, P., Kanske, P., Engen, H., & Singer, T. (2021). Decreased emotional reactivity after 3-month socio-affective but not attention- or meta-cognitive-based mental training : A randomized, controlled, longitudinal fMRI study. *NeuroImage*, *237*, 118132. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118132>
- Fedorenko, E., Duncan, J., & Kanwisher, N. (2013). Broad domain generality in focal regions of frontal and parietal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(41), 16616-16621. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315235110>
- Fehlbaum, L. V., Raschle, N. M., Menks, W. M., Prätzlich, M., Flemming, E., Wyss, L., Euler, F., Sheridan, M., Sterzer, P., & Stadler, C. (2018). Altered Neuronal Responses During an Affective Stroop Task in Adolescents With Conduct Disorder. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1961. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01961>
- Feil, J., Sheppard, D., Fitzgerald, P. B., Yücel, M., Lubman, D. I., & Bradshaw, J. L. (2010). Addiction, compulsive drug seeking, and the role of frontostriatal mechanisms in regulating inhibitory control. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *35*(2), 248-275. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.03.001>
- Feldman, G., Greeson, J., & Senville, J. (2010). Differential effects of mindful breathing, progressive muscle relaxation, and loving-kindness meditation on decentering and negative reactions to repetitive thoughts. *Behaviour Research and Therapy*, *48*(10), 1002-1011. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2010.06.006>
- Feldman, J., & Barshi, I. (2007). *The Effects of Blood Glucose Levels on Cognitive Performance : A Review of the Literature* [Technical Report,]. NASA. <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070031714>
- Fernández García, L., Merchán, A., Phillips-Silver, J., & Daza González, M. T. (2021). Neuropsychological Development of Cool and Hot Executive Functions Between 6 and 12 Years of Age : A Systematic Review. *Frontiers in Psychology*, *12*, 687337. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.687337>
- Fields, S. A., Sabet, M., & Reynolds, B. (2013). Dimensions of impulsive behavior in obese, overweight, and healthy-weight adolescents. *Appetite*, *70*, 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2013.06.089>
- Fitzpatrick, S., Gilbert, S., & Serpell, L. (2013). Systematic Review : Are Overweight and Obese Individuals Impaired on Behavioural Tasks of Executive Functioning? *Neuropsychology Review*, *23*(2), 138-156. <https://doi.org/10.1007/s11065-013-9224-7>
- Fjell, A. M., Walhovd, K. B., Brown, T. T., Kuperman, J. M., Chung, Y., Hagler, D. J., & Gruen, J. (2012). Multimodal imaging of the self-regulating developing brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(48), 19620-19625. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208243109>
- Fjell, A. M., Westlye, L. T., Amlien, I., Espeseth, T., Reinvang, I., Raz, N., Agartz, I., Salat, D. H., Greve, D. N., Fischl, B., Dale, A. M., & Walhovd, K. B. (2009). High consistency of regional cortical thinning in aging across multiple samples. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *19*(9), 2001-2012. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn232>

- Fjell, A., Mcevoy, L., Holland, D., Dale, A., & Walhovd, K. (2014). What is normal in normal aging? Effects of Aging, Amyloid and Alzheimer's Disease on the Cerebral Cortex and the Hippocampus. *Progress in Neurobiology*, *117*. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2014.02.004>
- Flint, R. W., & Turek, C. (2003). Glucose effects on a continuous performance test of attention in adults. *Behavioural Brain Research*, *142*(1-2), 217-228. [https://doi.org/10.1016/s0166-4328\(03\)00002-0](https://doi.org/10.1016/s0166-4328(03)00002-0)
- Flook, L., Smalley, S. L., Kitil, M. J., Galla, B. M., Kaiser-Greenland, S., Locke, J., & Kasari, C. (2010). Effects of Mindful Awareness Practices on Executive Functions in Elementary School Children. *Journal of Applied School Psychology*, *26*(1).
- Flores, C. (2011). Role of netrin-1 in the organization and function of the mesocorticolimbic dopamine system. *Journal of Psychiatry & Neuroscience: JPN*, *36*(5), 296-310. <https://doi.org/10.1503/jpn.100171>
- Fornito, A., Malhi, G. S., Lagopoulos, J., Ivanovski, B., Wood, S. J., Velakoulis, D., Saling, M. M., McGorry, P. D., Pantelis, C., & Yücel, M. (2007). In vivo evidence for early neurodevelopmental anomaly of the anterior cingulate cortex in bipolar disorder. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, *116*(6), 467-472. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0447.2007.01069.x>
- Fornito, A., Yücel, M., Wood, S., Stuart, G. W., Buchanan, J. A., Proffitt, T., Anderson, V., Velakoulis, D., & Pantelis, C. (2004). Individual differences in anterior cingulate/paracingulate morphology are related to executive functions in healthy males. *Cereb Cortex*, *14*(424), 431.
- Forstmann, B. U., Jahfari, S., Scholte, H. S., Wolfensteller, U., Wildenberg, W. P. M. van den, & Ridderinkhof, K. R. (2008). Function and Structure of the Right Inferior Frontal Cortex Predict Individual Differences in Response Inhibition: A Model-Based Approach. *Journal of Neuroscience*, *28*(39), 9790-9796. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1465-08.2008>
- Forstmann, B. U., Keuken, M. C., Jahfari, S., Bazin, P.-L., Neumann, J., Schäfer, A., & Turner, R. (2012). Cortico-subthalamic white matter tract strength predicts interindividual efficacy in stopping a motor response. *NeuroImage*, *60*(1), 370-375. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.12.044>
- Fox, K. C. R., Nijeboer, S., Dixon, M. L., Floman, J. L., Ellamil, M., Rumak, S. P., Sedlmeier, P., & Christoff, K. (2014). Is meditation associated with altered brain structure? A systematic review and meta-analysis of morphometric neuroimaging in meditation practitioners. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *43*, 48-73. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.03.016>
- Frank, M. J., & Hutchison, K. (2009). Genetic contributions to avoidance-based decisions : Striatal D2 receptor polymorphisms. *Neuroscience*, *164*(1), 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.04.048>
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The Relations Among Inhibition and Interference Control Functions : A Latent-Variable Analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*(1), 101-135. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.1.101>
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions : Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, *86*, 186-204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not All Executive Functions Are Related to Intelligence. *Psychological Science*, *17*(2), 172-179. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x>
- Friebs, M. A., Dechant, M., Vedress, S., Frings, C., & Mandryk, R. L. (2020). Effective Gamification of the Stop-Signal Task : Two Controlled Laboratory Experiments. *JMIR Serious Games*, *8*(3), e17810. <https://doi.org/10.2196/17810>
- Frydecka, D., Misiak, B., Piotrowski, P., Bielawski, T., Pawlak, E., Kłosińska, E., Krefft, M., Al Noaimy, K., Rymaszewska, J., Moustafa, A. A., & Drapała, J. (2021). The Role of Dopaminergic Genes in Probabilistic Reinforcement Learning in Schizophrenia Spectrum Disorders. *Brain Sciences*, *12*(1), 7. <https://doi.org/10.3390/brainsci12010007>
- Fuhrmann, D., Knoll, L. J., & Blakemore, S.-J. (2015). Adolescence as a sensitive period of brain development. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*, 558-566.

- Fujiwara, H., Hirao, K., Namiki, C., Yamada, M., Shimizu, M., Fukuyama, H., Hayashi, T., & Murai, T. (2007). Anterior cingulate pathology and social cognition in schizophrenia : A study of gray matter, white matter and sulcal morphometry. *NeuroImage*, *36*(4), 1236-1245. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.068>
- Fujiyama, H., Tan, J., Puri, R., & Hinder, M. R. (2022). Influence of tDCS over right inferior frontal gyrus and pre-supplementary motor area on perceptual decision-making and response inhibition : A healthy ageing perspective. *Neurobiology of Aging*, *109*, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2021.09.014>
- Fuke, S., Suo, S., Takahashi, N., Koike, H., Sasagawa, N., & Ishiura, S. (2001). The VNTR polymorphism of the human dopamine transporter (DAT1) gene affects gene expression. *The Pharmacogenomics Journal*, *1*(2), Art. 2. <https://doi.org/10.1038/sj.tpj.6500026>
- Fuster, J. M. (1991). The prefrontal cortex and its relation to behavior. *Progress in Brain Research*, *87*, 201-211. [https://doi.org/10.1016/s0079-6123\(08\)63053-8](https://doi.org/10.1016/s0079-6123(08)63053-8)
- Fuster, J. M. (2001). The prefrontal cortex—An update : Time is of the essence. *Neuron*, *30*, 319-333. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00285-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00285-9)
- Gaal, S., Lamme, V. A. F., Fahrenfort, J. J., & Ridderinkhof, K. R. (2011). Dissociable brain mechanisms underlying the conscious and unconscious control of behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(1), 91-105. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21431>
- Gaal, S., Ridderinkhof, K. R., Fahrenfort, J. J., Scholte, H. S., & Lamme, V. A. F. (2008). Frontal cortex mediates unconsciously triggered inhibitory control. *Journal of Neuroscience*, *28*, 8053-8062. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1278-08.2008>
- Gaal, S., Ridderinkhof, K. R., Scholte, H. S., & Lamme, V. A. F. (2010). Unconscious activation of the prefrontal no-go network. *Journal of Neuroscience*, *30*, 4143-4150. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2992-09.2010>
- Gagne, J. R., & Saudino, K. J. (2010). Wait For It ! A Twin Study of Inhibitory Control in Early Childhood. *Behavior genetics*, *40*(3), 327-337. <https://doi.org/10.1007/s10519-009-9316-6>
- Gailliot, M. T., Baumeister, R. F., DeWall, C. N., Maner, J. K., Plant, E. A., Tice, D. M., Brewer, L. E., & Schmeichel, B. J. (2007). Self-control relies on glucose as a limited energy source : Willpower is more than a metaphor. *Journal of Personality and Social Psychology*, *92*(2), 325-336. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.92.2.325>
- Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2016). Physical activity and neurocognitive functioning in aging—A condensed updated review. *European Review of Aging and Physical Activity*, *13*(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s11556-016-0161-3>
- Galambos, N. L., MacDonald, S. W. S., Naphtali, C., Cohen, A.-L., & Frias, C. M. (2005). Cognitive performance differentiates selected aspects of psychosocial maturity in adolescence. *Developmental Neuropsychology*, *28*(1), 473-492. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2801\\_2](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2801_2)
- Galaverna, F. S., Morra, C. A., & Bueno, A. M. (2012). Attention in patients with chronic schizophrenia : Deficit in inhibitory control and positive symptoms. *The European Journal of Psychiatry*, *26*(3), 185-195. <https://doi.org/10.4321/S0213-61632012000300005>
- Galioto, R., & Spitznagel, M. B. (2016). The Effects of Breakfast and Breakfast Composition on Cognition in Adults. *Advances in Nutrition (Bethesda, Md.)*, *7*(3), 576S-89S. <https://doi.org/10.3945/an.115.010231>
- Galván, A. (2010). Neural plasticity of development and learning. *Human Brain Mapping*, *31*(6), 879-890. <https://doi.org/10.1002/hbm.21029>
- Galvan, A., Hare, T. A., Parra, C. E., Penn, J., Voss, H., Glover, G., & Casey, B. J. (2006). Earlier Development of the Accumbens Relative to Orbitofrontal Cortex Might Underlie Risk-Taking Behavior in Adolescents. *Journal of Neuroscience*, *26*(25), 6885-6892. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1062-06.2006>
- Garcia-Garcia, M., Barceló, F., Clemente, I. C., & Escera, C. (2010). The role of the dopamine transporter DAT1 genotype on the neural correlates of cognitive flexibility. *The European Journal of Neuroscience*, *31*(4), 754-760. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2010.07102.x>

- Gard, T., Hölzel, B. K., Sack, A. T., Hempel, H., Lazar, S. W., Vaitl, D., & Ott, U. (2012). Pain attenuation through mindfulness is associated with decreased cognitive control and increased sensory processing in the brain. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *22*(11), 2692-2702. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr352>
- Garland, E., Gaylord, S., & Park, J. (2009). The Role of Mindfulness in Positive Reappraisal. *EXPLORE*, *5*(1), 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2008.10.001>
- 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>
- Garrison, J. R., Fernyhough, C., McCarthy-Jones, S., Haggard, M., & Simons, J. S. (2015). Paracingulate sulcus morphology is associated with hallucinations in the human brain. *Nature Communications*, *6*(1), 8956. <https://doi.org/10.1038/ncomms9956>
- Gasquoine, P. G. (2013). Localization of function in anterior cingulate cortex : From psychosurgery to functional neuroimaging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(3), 340-348. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.01.002>
- Gathercole, S. E., S.J., P., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, *40*, 177-190.
- Geier, C. F., & Luna, B. (2012). Developmental Effects of Incentives on Response Inhibition. *Child Development*, *83*(4), 1262-1274. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01771.x>
- Geier, C. F., Terwilliger, R., Teslovich, T., Velanova, K., & Luna, B. (2010). Immaturities in reward processing and its influence on inhibitory control in adolescence. *Cerebral Cortex*, *20*(7), 1613-1629. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp225>
- Geijselaers, S. L. C., Sep, S. J. S., Stehouwer, C. D. A., & Biessels, G. J. (2015). Glucose regulation, cognition, and brain MRI in type 2 diabetes : A systematic review. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, *3*(1), 75-89. [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(14\)70148-2](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(14)70148-2)
- Georgiou, S. N., Charalambous, K., & Stavrinides, P. (2020). Mindfulness, impulsivity, and moral disengagement as parameters of bullying and victimization at school. *Aggressive Behavior*, *46*(1), 107-115. <https://doi.org/10.1002/ab.21876>
- Geronimi, E. M. C., Arellano, B., & Woodruff-Borden, J. (2020). Relating mindfulness and executive function in children. *Clinical Child Psychology and Psychiatry*, *25*(2), 435-445. <https://doi.org/10.1177/1359104519833737>
- Geurts, H. M., de Vries, M., & van den Bergh, S. F. W. M. (2014). Executive Functioning Theory and Autism. In S. Goldstein & J. A. Naglieri (Éds.), *Handbook of Executive Functioning* (p. 121-141). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8106-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8106-5_8)
- Geurts, H. M., Oord, S., & Crone, E. A. (2006). Hot and cool aspects of cognitive control in children with ADHD: Decision-making and inhibition. *Journal of Abnormal Child Psychology*, *34*, 813-824.
- Geva, R., Zivan, M., Warsha, A., & Olchik, D. (2013). Alerting, orienting or executive attention networks : Differential patters of pupil dilations. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *7*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnbeh.2013.00145>
- Ghaziri, J., Tucholka, A., Girard, G., Houde, J.-C., Boucher, O., Gilbert, G., Descoteaux, M., Lippé, S., Rainville, P., & Nguyen, D. K. (2017). The Corticocortical Structural Connectivity of the Human Insula. *Cerebral Cortex*, *27*(2), 1216-1228. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv308>
- Gibbons, C. H., Adler, G. K., Bonyhay, I., & Freeman, R. (2012). Experimental hypoglycemia is a human model of stress-induced hyperalgesia. *Pain*, *153*(11), 2204-2209. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2012.06.030>
- Giedd, J. N. (2009). Linking adolescent sleep, brain maturation, and behavior. *The Journal of Adolescent Health: Official Publication of the Society for Adolescent Medicine*, *45*(4), 319-320. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2009.07.007>
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., & Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence : A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, *2*(10), 861-863. <https://doi.org/10.1038/13158>

- Giedd, J. N., & Rapoport, J. L. (2010). Structural MRI of Pediatric Brain Development : What Have We Learned and Where Are We Going? *Neuron*, 67(5), 728-734. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.08.040>
- Giedd, J. N., Raznahan, A., Alexander-Bloch, A., Schmitt, E., Gogtay, N., & Rapoport, J. L. (2015). Child psychiatry branch of the National Institute of Mental Health longitudinal structural magnetic resonance imaging study of human brain development. *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 40(1), 43-49. <https://doi.org/10.1038/npp.2014.236>
- Giluk, T. L. (2009). Mindfulness, Big Five personality, and affect : A meta-analysis. *Personality and Individual Differences*, 47(8), 805-811. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2009.06.026>
- Gioia, G. A., Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. (2000a). *Behavior rating inventory of executive function professional manual*. Psychological Assessment Resources.
- Gioia, G. A., Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. (2000b). TEST REVIEW Behavior Rating Inventory of Executive Function. *Child Neuropsychology*, 6(3), 235-238. <https://doi.org/10.1076/chin.6.3.235.3152>
- Goeleven, E., De Raedt, R., Baert, S., & Koster, E. H. W. (2006). Deficient inhibition of emotional information in depression. *Journal of Affective Disorders*, 93(1-3), 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2006.03.007>
- Goghari, V. M., Krzyzanowski, D., Yoon, S., Dai, Y., & Toews, D. (2020). Attitudes and Beliefs Toward Computerized Cognitive Training in the General Population. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2020.00503>
- Goghari, V. M., & MacDonald, A. W. (2009). The Neural Basis of Cognitive Control : Response Selection and Inhibition. *Brain and cognition*, 71(2), 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.04.004>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., & others. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(21), 8174-8179.
- Gold, A. E., Deary, I. J., MacLeod, K. M., & Frier, B. M. (1995). The effect of IQ level on the degree of cognitive deterioration experienced during acute hypoglycemia in normal humans. *Intelligence*, 20(3), 267-290. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(95\)90011-X](https://doi.org/10.1016/0160-2896(95)90011-X)
- Goldman-Rakic, P. S., Muly, E. C., & Williams, G. V. (2000). D(1) receptors in prefrontal cells and circuits. *Brain Research. Brain Research Reviews*, 31(2-3), 295-301. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(99\)00045-4](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(99)00045-4)
- Goldstein, R. Z., & Volkow, N. D. (2011). Dysfunction of the prefrontal cortex in addiction : Neuroimaging findings and clinical implications. *Nature Reviews. Neuroscience*, 12(11), 652-669. <https://doi.org/10.1038/nrn3119>
- Goleman, D. J., & Schwartz, G. E. (1976). Meditation as an intervention in stress reactivity. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 44(3), 456-466. <https://doi.org/10.1037/0022-006X.44.3.456>
- Gotink, R. A., Meijboom, R., Vernooij, M. W., Smits, M., & Hunink, M. G. M. (2016). 8-week Mindfulness Based Stress Reduction induces brain changes similar to traditional long-term meditation practice—A systematic review. *Brain and Cognition*, 108, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2016.07.001>
- Gottwald, B., Mihajlovic, Z., Wilde, B., & Mehdorn, H. M. (2003). Does the cerebellum contribute to specific aspects of attention? *Neuropsychologia*, 41(11), 1452-1460. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(03\)00090-3](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(03)00090-3)
- Gould, L. F., Dariotis, J. K., Mendelson, T., & Greenberg, Mark. T. (2012). A School-Based Mindfulness Intervention for Urban Youth : Exploring Moderators of Intervention Effects. *Journal of Community Psychology*, 40(8), 968-982. <https://doi.org/10.1002/jcop.21505>



- Gozukara Bag, H. G. (2018). Association between COMT gene rs165599 SNP and schizophrenia : A meta-analysis of case-control studies. *Molecular Genetics & Genomic Medicine*, 6(5), 845-854. <https://doi.org/10.1002/mgg3.468>
- Grant, J. A., Courtemanche, J., Duerden, E. G., Duncan, G. H., & Rainville, P. (2010). Cortical thickness and pain sensitivity in zen meditators. *Emotion (Washington, D.C.)*, 10(1), 43-53. <https://doi.org/10.1037/a0018334>
- Graveling, A. J., Deary, I. J., & Frier, B. M. (2013). Acute Hypoglycemia Impairs Executive Cognitive Function in Adults With and Without Type 1 Diabetes. *Diabetes Care*, 36(10), 3240-3246. <https://doi.org/10.2337/dc13-0194>
- Graziano, P. A., Calkins, S. D., & Keane, S. P. (2010). Toddler self-regulation skills predict risk for pediatric obesity. *International journal of obesity (2005)*, 34(4), 633-641. <https://doi.org/10.1038/ijo.2009.288>
- Green, A. A., & Kinchen, E. V. (2021). The Effects of Mindfulness Meditation on Stress and Burnout in Nurses. *Journal of Holistic Nursing: Official Journal of the American Holistic Nurses' Association*, 39(4), 356-368. <https://doi.org/10.1177/089801012111015818>
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2008a). Exercising your brain : A review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychology and Aging*, 23(4), 692-701. <https://doi.org/10.1037/a0014345>
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2008b). Exercising your brain : A review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychology and Aging*, 23(4), 692-701. <https://doi.org/10.1037/a0014345>
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2012). Learning, attentional control, and action video games. *Current Biology: CB*, 22(6), 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.02.012>
- Green, C. S., Gorman, T., & Bavelier, D. (2016). Action video-game training and its effects on perception and attentional control. In *Cognitive training : An overview of features and applications* (p. 107-116). Springer International Publishing AG. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4_10)
- Green, C. S., Strobach, T., & Schubert, T. (2014). On methodological standards in training and transfer experiments. *Psychological Research*, 78(6), 756-772. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0535-3>
- Greene, D. J., Koller, J. M., Hampton, J. M., Wesevich, V., Van, A. N., Nguyen, A. L., & Dosenbach, N. U. F. (2018). Behavioral interventions for reducing head motion during MRI scans in children. *NeuroImage*, 171, 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.01.023>
- Greenlee, J. D. W., Oya, H., Kawasaki, H., Volkov, I. O., Severson, M. A., Howard, M. A., & Brugge, J. F. (2007). Functional connections within the human inferior frontal gyrus. *The Journal of Comparative Neurology*, 503(4), 550-559. <https://doi.org/10.1002/cne.21405>
- Greicius, M. D., Krasnow, B., Reiss, A. L., & Menon, V. (2003). Functional connectivity in the resting brain : A network analysis of the default mode hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(1), 253-258.
- Grinspun, N., Nijs, L., Kausel, L., Onderdijk, K., Sepúlveda, N., & Rivera-Hutinel, A. (2020). Selective Attention and Inhibitory Control of Attention Are Correlated With Music Audiation. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2020.01109>
- Groot, A. S., de Sonnevile, L. M. J., Stins, J. F., & Boomsma, D. I. (2004). Familial influences on sustained attention and inhibition in preschoolers. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 45(2), 306-314. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00222.x>
- Grosbras, M.-H., Ross, P. D., & Belin, P. (2018). Categorical emotion recognition from voice improves during childhood and adolescence. *Scientific Reports*, 8(1), 14791. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32868-3>
- Gross, J. J., & John, O. P. (2003). Individual differences in two emotion regulation processes : Implications for affect, relationships, and well-being. *Journal of Personality and Social Psychology*, 85(2), 348-362. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.85.2.348>

- Grossman, P., Niemann, L., Schmidt, S., & Walach, H. (2004). Mindfulness-based stress reduction and health benefits : A meta-analysis. *Journal of Psychosomatic Research*, *57*(1), 35-43. [https://doi.org/10.1016/S0022-3999\(03\)00573-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3999(03)00573-7)
- Guillin, O., Diaz, J., Carroll, P., Griffon, N., Schwartz, J. C., & Sokoloff, P. (2001). BDNF controls dopamine D3 receptor expression and triggers behavioural sensitization. *Nature*, *411*(6833), 86-89. <https://doi.org/10.1038/35075076>
- Gunstad, J., Paul, R. H., Cohen, R. A., Tate, D. F., Spitznagel, M. B., & Gordon, E. (2007). Elevated body mass index is associated with executive dysfunction in otherwise healthy adults. *Comprehensive Psychiatry*, *48*(1), 57-61. <https://doi.org/10.1016/j.comppsy.2006.05.001>
- Gunstad, J., Spitznagel, M. B., Paul, R. H., Cohen, R. A., Kohn, M., Luyster, F. S., Clark, R., Williams, L. M., & Gordon, E. (2008). Body mass index and neuropsychological function in healthy children and adolescents. *Appetite*, *50*(2), 246-251. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2007.07.008>
- Guyer, A. E., Silk, J. S., & Nelson, E. E. (2016). The neurobiology of the emotional adolescent : From the inside out. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, *70*, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.07.037>
- Haase, L., Thom, N. J., Shukla, A., Davenport, P. W., Simmons, A. N., Stanley, E. A., Paulus, M. P., & Johnson, D. C. (2016). Mindfulness-based training attenuates insula response to an aversive interoceptive challenge. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *11*(1), 182-190. <https://doi.org/10.1093/scan/nsu042>
- Habas, P. A., Scott, J. A., Roosta, A., Rajagopalan, V., Kim, K., Rousseau, F., Barkovich, A. J., Glenn, O. A., & Studholme, C. (2012). Early Folding Patterns and Asymmetries of the Normal Human Brain Detected from in Utero MRI. *Cerebral Cortex (New York, NY)*, *22*(1), 13-25. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr053>
- Haber, S. N. (2016). Chapter 27—Integrative Networks Across Basal Ganglia Circuits. In H. Steiner & K. Y. Tseng (Éds.), *Handbook of Behavioral Neuroscience* (Vol. 24, p. 535-552). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802206-1.00027-1>
- Habib, M., Borst, G., Poirel, N., Houdé, O., Moutier, S., & Cassotti, M. (2015). Socio-emotional context and adolescents' decision making : The experience of regret and relief after social comparison. *Journal of Research on Adolescence*, *25*, 81-91.
- Hackman, D. A., Gallop, R., Evans, G. W., & Farah, M. J. (2015). Socioeconomic status and executive function : Developmental trajectories and mediation. *Developmental Science*, *18*(5), 686-702. <https://doi.org/10.1111/desc.12246>
- Hagenauer, M. H., Perryman, J. I., Lee, T. M., & Carskadon, M. A. (2009). Adolescent changes in the homeostatic and circadian regulation of sleep. *Developmental Neuroscience*, *31*(4), 276-284. <https://doi.org/10.1159/000216538>
- Hambleton, R. K., Traub, R. E., & Traub, R. E. (1974). The Effects of Item Order on Test Performance and Stress. *The Journal of Experimental Education*, *43*(1), 40-46.
- Hamelin, H., Poizat, G., Florian, C., Kursa, M. B., Pittaras, E., Callebert, J., Rampon, C., Taouis, M., Hamed, A., & Granon, S. (2021). Prolonged Consumption of Sweetened Beverages Lastingly Deteriorates Cognitive Functions and Reward Processing in Mice. *Cerebral Cortex*. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhab274>
- Hampshire, A., Chamberlain, S. R., Monti, M. M., Duncan, J., & Owen, A. M. (2010). The role of the right inferior frontal gyrus : Inhibition and attentional control. *NeuroImage*, *50*(3), 1313-1319. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.109>
- Han, S., & Northoff, G. (2008). Culture-sensitive neural substrates of human cognition : A transcultural neuroimaging approach. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*(8), Art. 8. <https://doi.org/10.1038/nrn2456>
- Hannah, R., & Jana, S. (2019). Disentangling the role of posterior parietal cortex in response inhibition. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *39*(35), 6814-6816. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0785-19.2019>
- Hansen, M. V. (2014). Chronobiology, cognitive function and depressive symptoms in surgical patients. *Danish Medical Journal*, *61*(9), B4914.

- Haraldsson, H. M., Ettinger, U., Magnúsdóttir, B. B., Sigmundsson, T., Sigurdsson, E., Ingason, A., & Petursson, H. (2010). Catechol-O-Methyltransferase Val158Met Polymorphism and Antisaccade Eye Movements in Schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, *36*(1), 157-164. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbn064>
- Harenski, C. L., & Hamann, S. (2006). Neural correlates of regulating negative emotions related to moral violations. *NeuroImage*, *30*(1), 313-324. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.09.034>
- Harnishfeger, K. K. (1995). The development of cognitive inhibition : Theories, definitions, and research evidence. In *Interference and inhibition in cognition* (p. 175-204). Elsevier.
- Harnishfeger, K. K., & Bjorklund, D. F. (1994). A developmental perspective on individual differences in inhibition. *Learning and Individual Differences*, *6*(3), 331-355.
- Hartung, J., Engelhardt, L. E., Thibodeaux, M. L., Harden, K. P., & Tucker-Drob, E. M. (2020). Developmental transformations in the structure of executive functions. *Journal of Experimental Child Psychology*, *189*, 104681. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104681>
- Hartwigsen, G., Neef, N. E., Camilleri, J. A., Margulies, D. S., & Eickhoff, S. B. (2019). Functional Segregation of the Right Inferior Frontal Gyrus : Evidence From Coactivation-Based Parcellation. *Cerebral Cortex*, *29*(4), 1532-1546. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy049>
- H.A.S, H. A. de S. (2011). *Surpoids et obésité de l'enfant et de l'adolescent*. DCI / SDIP Hauté Autorité de Santé. [https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2011-10/reco2clics\\_obesite\\_enfant\\_adolescent.pdf](https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2011-10/reco2clics_obesite_enfant_adolescent.pdf)
- Hatfield, J., Williamson, A., Kehoe, E. J., Lemon, J., Arguel, A., Prabhakaran, P., & Job, R. F. S. (2018). The effects of training impulse control on simulated driving. *Accident Analysis & Prevention*, *119*, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.06.012>
- Hawkins, M. A. W., Gunstad, J., Calvo, D., & Spitznagel, M. B. (2016). Higher fasting glucose is associated with poorer cognition among healthy young adults. *Health Psychology*, *35*(2), 199-202. <https://doi.org/10.1037/hea0000248>
- Hazlett, E. A., New, A. S., Newmark, R., Haznedar, M. M., Lo, J. N., Speiser, L. J., Chen, A. D., Mitropoulou, V., Minzenberg, M., Siever, L. J., & Buchsbaum, M. S. (2005). Reduced anterior and posterior cingulate gray matter in borderline personality disorder. *Biological Psychiatry*, *58*(8), 614-623. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.04.029>
- Hazy, T. E., Frank, M. J., & O'Reilly, R. C. (2007). Towards an executive without a homunculus : Computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *362*(1485), 1601-1613. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2055>
- He, Q., Shen, Z., Ren, L., Wang, X., Qian, M., Zhu, J., & Shen, X. (2020). The association of catechol-O-methyltransferase (COMT) rs4680 polymorphisms and generalized anxiety disorder in the Chinese Han population. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*, *13*(7), 1712-1719.
- Heeren, A., Douilliez, C., Peschard, V., Debrauwere, L., & Philippot, P. (2011). Cross-cultural validity of the Five Facets Mindfulness Questionnaire : Adaptation and validation in a French-speaking sample. *European Review of Applied Psychology*, *61*(3), 147-151. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2011.02.001>
- Heilbronner, S. R., & Hayden, B. Y. (2016). Dorsal Anterior Cingulate Cortex : A Bottom-Up View. *Annual Review of Neuroscience*, *39*, 149-170. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-070815-013952>
- Hensch, T. K. (2004). Critical period regulation. *Annual Review of Neuroscience*, *27*, 549-579. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144327>
- Hermans, L., Beeckmans, K., Michiels, K., Lafosse, C., Sunaert, S., Coxon, J. P., Swinnen, S. P., & Leunissen, I. (2017). Proactive Response Inhibition and Subcortical Gray Matter Integrity in Traumatic Brain Injury. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, *31*(3), 228-239. <https://doi.org/10.1177/1545968316675429>

- Heugten, C. M., Ponds, R. W. H. M., & Kessels, R. P. C. (2016). Brain training : Hype or hope? *Neuropsychological Rehabilitation*, 26(5-6), 639-644. <https://doi.org/10.1080/09602011.2016.1186101>
- Hill, J., Dierker, D., Neil, J., Inder, T., Knutsen, A., Harwell, J., Coalson, T., & Van Essen, D. (2010). A Surface-Based Analysis of Hemispheric Asymmetries and Folding of Cerebral Cortex in Term-Born Human Infants. *The Journal of Neuroscience*, 30(6), 2268-2276. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4682-09.2010>
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart : Exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews. Neuroscience*, 9(1), 58-65. <https://doi.org/10.1038/nrn2298>
- Hillman, C. H., McAuley, E., Erickson, K. I., Liu-Ambrose, T., & Kramer, A. F. (2019). On mindful and mindless physical activity and executive function : A response to Diamond and Ling (2016). *Developmental Cognitive Neuroscience*, 37, 100529. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.01.006>
- Himes, L., Hubbard, N. A., Maruthy, G. B., Gallagher, J., Turner, M. P., & Rypma, B. (2021). The Relationship between Trait Mindfulness and Emotional Reactivity Following Mood Manipulation. *Mindfulness*, 12(1), 170-185. <https://doi.org/10.1007/s12671-020-01510-7>
- Histel-Barontini, L. (2021). Outil 19. La méditation du raisin sec. *BaO La Boite a Outils*, 68-69.
- Hoff, A. L., Riordan, H., O'Donnell, D., Stritzke, P., Neale, C., Boccio, A., Anand, A. K., & DeLisi, L. E. (1992). Anomalous lateral sulcus asymmetry and cognitive function in first-episode schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, 18(2), 257-272. <https://doi.org/10.1093/schbul/18.2.257>
- Hofman, M. A., & Swaab, D. F. (2006). Living by the clock : The circadian pacemaker in older people. *Ageing Research Reviews*, 5, 33-51.
- Holas, P., & Jankowski, T. (2013). A cognitive perspective on mindfulness. *International Journal of Psychology*, 48(3), 232-243. <https://doi.org/10.1080/00207594.2012.658056>
- Holmboe, K., Bonneville-Roussy, A., Csibra, G., & Johnson, M. H. (2018). Longitudinal development of attention and inhibitory control during the first year of life. *Developmental Science*, 21(6), e12690. <https://doi.org/10.1111/desc.12690>
- Holmboe, K., Larkman, C., de Klerk, C., Simpson, A., Bell, M. A., Patton, L., Christodoulou, C., & Dvergsdal, H. (2021). The early childhood inhibitory touchscreen task : A new measure of response inhibition in toddlerhood and across the lifespan. *PloS One*, 16(12), e0260695. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260695>
- Holmboe, K., Pasco Fearon, R. M., Csibra, G., Tucker, L. A., & Johnson, M. H. (2008). Freeze-Frame : A new infant inhibition task and its relation to frontal cortex tasks during infancy and early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 100(2), 89-114. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.09.004>
- Holtzer, R., Shuman, M., Mahoney, J. R., Lipton, R., & Verghese, J. (2011). Cognitive fatigue defined in the context of attention networks. *Neuropsychology, Development, and Cognition. Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition*, 18(1), 108-128. <https://doi.org/10.1080/13825585.2010.517826>
- Hölzel, B. K., Carmody, J., Evans, K. C., Hoge, E. A., Dusek, J. A., Morgan, L., Pitman, R. K., & Lazar, S. W. (2010). Stress reduction correlates with structural changes in the amygdala. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 5(1), 11-17. <https://doi.org/10.1093/scan/nsp034>
- Hölzel, B. K., Carmody, J., Vangel, M., Congleton, C., Yerramsetti, S. M., Gard, T., & Lazar, S. W. (2011). Mindfulness practice leads to increases in regional brain gray matter density. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 191(1), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.psychresns.2010.08.006>
- Hölzel, B. K., Lazar, S. W., Gard, T., Schuman-Olivier, Z., Vago, D. R., & Ott, U. (2011). How Does Mindfulness Meditation Work? Proposing Mechanisms of Action From a Conceptual and Neural Perspective. *Perspectives on Psychological Science*, 6(6), 537-559. <https://doi.org/10.1177/1745691611419671>

- Hölzel, B. K., Ott, U., Gard, T., Hempel, H., Weygandt, M., Morgen, K., & Vaitl, D. (2008). Investigation of mindfulness meditation practitioners with voxel-based morphometry. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 3(1), 55-61. <https://doi.org/10.1093/scan/nsm038>
- Hölzel, B. K., Ott, U., Hempel, H., Hackl, A., Wolf, K., Stark, R., & Vaitl, D. (2007). Differential engagement of anterior cingulate and adjacent medial frontal cortex in adept meditators and non-meditators. *Neuroscience Letters*, 421(1), 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.04.074>
- Hong, P., Lishner, D., & Han, K. (2014). Mindfulness and Eating : An Experiment Examining the Effect of Mindful Raisin Eating on the Enjoyment of Sampled Food. *Mindfulness*, 5. <https://doi.org/10.1007/s12671-012-0154-x>
- Hongwanishkul, D., Happaney, K. R., Lee, W. S. C., & Zelazo, P. D. (2005). Assessment of hot and cool executive function in young children: Age-related changes and individual differences. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 617-644. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802\\_4](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_4)
- Horne, J. A., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International Journal of Chronobiology*, 4(2), 97-110.
- Horwitz, T., Lam, K., Chen, Y., Xia, Y., & Liu, C. (2019). A decade in psychiatric GWAS research. *Molecular Psychiatry*, 24(3), 378-389. <https://doi.org/10.1038/s41380-018-0055-z>
- Houdé, O. (1995). La construction de l'objet. *Psychologie et sciences de la pensée*, 25-38.
- Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development : Object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15(1), 63-73. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(00\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(00)00015-0)
- Houdé, O. (2005). *La psychologie de l'enfant*. Presses universitaires de France.
- Houdé, O. (2007). Le rôle positif de l'inhibition dans le développement cognitif de l'enfant. *Le Journal des psychologues*, n° 244(1), 40-42.
- Houdé, O. (2014a). *Apprendre à résister*.
- Houdé, O. (2014b). *Le raisonnement*. Presses universitaires de France.
- Houdé, O. (2019). *Comment raisonne notre cerveau*.
- Houdé, O., & Borst, G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults : Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00616>
- Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148>
- Houdé, O., & Borst, G. (2018). *Le cerveau et les apprentissages : Écrire, respecter autrui, raisonner, compter, gérer ses émotions, mémoriser, lire*.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., & Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children : A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110(3), 332-346. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008>
- Houdé, O., Rossi, S., Lubin, A., & Joliot, M. (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain : An fMRI meta-analysis of 52 studies including 842 children : Meta-analysis of developmental fMRI data. *Developmental Science*, 13(6), 876-885. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00938.x>
- Houghton, G., Tipper, S. P., Weaver, B., & Shore, D. I. (1996). Inhibition and Interference in Selective Attention : Some Tests of a Neural Network Model. *Visual Cognition*, 3(2), 119-164. <https://doi.org/10.1080/713756733>
- Howard, S. J. (2016). Mindfulness may have risks as well as benefits. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 109(7), 259-259. <https://doi.org/10.1177/0141076816644113>
- Hu, M., Wang, X., Zhang, W., Hu, X., & Chen, A. (2017). Neural interactions mediating conflict control and its training-induced plasticity. *NeuroImage*, 163, 390-397. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.07.039>
- Huang, C.-C., Lu, S., Rios, J., Chen, Y., Stringham, M., & Cheung, S. (2020). Associations between Mindfulness, Executive Function, Social-Emotional Skills, and Quality of Life among Hispanic

- Children. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), E7796. <https://doi.org/10.3390/ijerph17217796>
- Huang, F.-Y., Hsu, A.-L., Hsu, L.-M., Tsai, J.-S., Huang, C.-M., Chao, Y.-P., Hwang, T.-J., & Wu, C. W. (2019). Mindfulness Improves Emotion Regulation and Executive Control on Bereaved Individuals: An fMRI Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2018.00541>
- Huang, S.-Y., Chen, H.-K., Ma, K.-H., Shy, M.-J., Chen, J.-H., Lin, W.-C., & Lu, R.-B. (2010). Association of promoter variants of human dopamine transporter gene with schizophrenia in Han Chinese. *Schizophrenia Research*, 116(1), 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2009.10.004>
- Huang, W., & Li, M. D. (2009). Differential allelic expression of dopamine D1 receptor gene (DRD1) is modulated by microRNA miR-504. *Biological Psychiatry*, 65(8), 702-705. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2008.11.024>
- Hughes, C. (1998). Executive function in preschoolers: Links with theory of mind and verbal ability. *British Journal of Developmental Psychology*, 16(2), 233-253. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1998.tb00921.x>
- Huijbregts, S. C. J., Warren, A. J., de Sonnevile, L. M. J., & Swaab-Barneveld, H. (2008). Hot and Cool Forms of Inhibitory Control and Externalizing Behavior in Children of Mothers who Smoked during Pregnancy: An Exploratory Study. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 36(3), 323-333. <https://doi.org/10.1007/s10802-007-9180-x>
- Huster, R. J., Westerhausen, R., & Herrmann, C. S. (2011). Sex differences in cognitive control are associated with midcingulate and callosal morphology. *Brain Structure & Function*, 215(3-4), 225-235. <https://doi.org/10.1007/s00429-010-0289-2>
- Huttenlocher, P. R. (2002). *Neural plasticity: The effects of environment on the development of the cerebral cortex*. Harvard University Press.
- Hwang, K., Hallquist, M. N., & Luna, B. (2013). The development of hub architecture in the human functional brain network. *Cerebral Cortex*, 23(10), 2380-2393. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs227>
- Hyman, C., Hofer, M., Barde, Y.-A., Juhasz, M., Yancopoulos, G. D., Squinto, S. P., & Lindsay, R. M. (1991). BDNF is a neurotrophic factor for dopaminergic neurons of the substantia nigra. *Nature*, 350(6315), Art. 6315. <https://doi.org/10.1038/350230a0>
- Innocent, O., ThankGod, O. O., Sandra, E. O., & Josiah, I. E. (2013). Correlation between body mass index and blood glucose levels among some Nigerian undergraduates. *HOAJ Biology*, 2(1), Art. 1. <https://doi.org/10.7243/2050-0874-2->
- Ionescu, S., Samurçay, N., Jourdan-Ionescu, C., Alain, M., Parent, P.-P., Rousseau, J., & Dery, M. (1986). Milieux socio-économiques et potentiel d'apprentissage. *Enfance*, 39(1), 91-108. <https://doi.org/10.3406/enfan.1986.2909>
- Ishizawa, K. T., Kumano, H., Sato, A., Sakura, H., & Iwamoto, Y. (2010). Decreased response inhibition in middle-aged male patients with type 2 diabetes. *BioPsychoSocial Medicine*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1186/1751-0759-4-1>
- Jackson, D. M., & Westlind-Danielsson, A. (1994). Dopamine receptors: Molecular biology, biochemistry and behavioural aspects. *Pharmacology & Therapeutics*, 64(2), 291-370. [https://doi.org/10.1016/0163-7258\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0163-7258(94)90041-8)
- Jadhav, N., Manthalkar, R., & Joshi, Y. (2017). Effect of meditation on emotional response: An EEG-based study. *Biomedical Signal Processing and Control*, 34, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.01.008>
- 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.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Shah, P. (2011). Short-and long-term benefits of cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25), 10081-10086. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103228108>

- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Shah, P., & Jonides, J. (2014). The role of individual differences in cognitive training and transfer. *Memory & Cognition*, 42(3), 464-480. <https://doi.org/10.3758/s13421-013-0364-z>
- Jahn, A., Nee, D. E., Alexander, W. H., & Brown, J. W. (2014). Distinct regions of anterior cingulate cortex signal prediction and outcome evaluation. *NeuroImage*, 95, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.03.050>
- Jain, S., Shapiro, S. L., Swanick, S., Roesch, S. C., Mills, P. J., Bell, I., & Schwartz, G. E. R. (2007). A randomized controlled trial of mindfulness meditation versus relaxation training : Effects on distress, positive states of mind, rumination, and distraction. *Annals of Behavioral Medicine: A Publication of the Society of Behavioral Medicine*, 33(1), 11-21. [https://doi.org/10.1207/s15324796abm3301\\_2](https://doi.org/10.1207/s15324796abm3301_2)
- Jana, S., & Aron, A. R. (2022). Mind Wandering Impedes Response Inhibition by Affecting the Triggering of the Inhibitory Process. *Psychological Science*, 33(7), 1068-1085. <https://doi.org/10.1177/09567976211055371>
- Janacsek, K., Fiser, J., & Nemeth, D. (2012). The Best Time to Acquire New Skills : Age-related Differences in Implicit Sequence Learning across Human Life Span. *Developmental Science*, 15(4), 496-505. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01150.x>
- Jankowski, T., & Holas, P. (2014). Metacognitive model of mindfulness. *Consciousness and cognition*, 28C, 64-80. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.06.005>
- Jasinska, A. J., Yasuda, M., Burant, C. F., Gregor, N., Khatri, S., Sweet, M., & Falk, E. B. (2012). Impulsivity and inhibitory control deficits are associated with unhealthy eating in young adults. *Appetite*, 59(3), 738-747. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2012.08.001>
- Jasińska, K. K., Molfese, P. J., Kornilov, S. A., Mencl, W. E., Frost, S. J., Lee, M., Pugh, K. R., Grigorenko, E. L., & Landi, N. (2016). The BDNF Val66Met Polymorphism Influences Reading Ability and Patterns of Neural Activation in Children. *PLoS One*, 11(8), e0157449. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157449>
- Jauch-Chara, K., Schmoller, A., & Oltmanns, K. M. (2011). Impaired glucose tolerance in healthy men with low body weight. *Nutrition Journal*, 10(1), 16. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-10-16>
- Jenkins, D. J., Wolever, T. M., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., Bowling, A. C., Newman, H. C., Jenkins, A. L., & Goff, D. V. (1981). Glycemic index of foods : A physiological basis for carbohydrate exchange. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 34(3), 362-366. <https://doi.org/10.1093/ajcn/34.3.362>
- Jenkins, L. N., Tennant, J. E., & Demaray, M. K. (2018). Executive functioning and bullying participant roles : Differences for boys and girls. *Journal of School Violence*, 17(4), 521-537. <https://doi.org/10.1080/15388220.2018.1453822>
- Jermann, F., Billieux, J., Larøi, F., d'Argembeau, A., Bondolfi, G., Zermatten, A., & Van der Linden, M. (2009). Mindful Attention Awareness Scale (MAAS) : Psychometric properties of the French translation and exploration of its relations with emotion regulation strategies. *Psychological Assessment*, 21(4), 506-514. <https://doi.org/10.1037/a0017032>
- Jha, A. P., Krompinger, J., & Baime, M. J. (2007). Mindfulness training modifies subsystems of attention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(2), 109-119. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.2.109>
- Jha, A. P., Stanley, E. A., Kiyonaga, A., Wong, L., & Gelfand, L. (2010). Examining the protective effects of mindfulness training on working memory capacity and affective experience. *Emotion (Washington, D.C.)*, 10(1), 54-64. <https://doi.org/10.1037/a0018438>
- Johann, V., Könen, T., & Karbach, J. (2019). The unique contribution of working memory, inhibition, cognitive flexibility, and intelligence to reading comprehension and reading speed. *Child Neuropsychology*, 26, 1-21. <https://doi.org/10.1080/09297049.2019.1649381>
- Johnson, M. H. (1995). The inhibition of automatic saccades in early infancy. *Developmental Psychobiology*, 28(5), 281-291. <https://doi.org/10.1002/dev.420280504>

- Johnson, M. H. (2011). Interactive Specialization : A domain-general framework for human functional brain development? *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(1), 7-21. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2010.07.003>
- Johnson, M. H., & Munakata, Y. (2005). Processes of change in brain and cognitive development. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3), 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.009>
- Johnson-greene, D., Adams, K. M., Oilman, S., Koeppe, R. A., Junck, L., Kluin, K. J., Martorello, S., & Heumann, M. (1997). Effects of abstinence and relapse upon neuropsychological function and cerebral glucose metabolism in severe chronic alcoholism. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 19(3), 378-385. <https://doi.org/10.1080/01688639708403866>
- Johnstone, S. J., Roodenrys, S., Phillips, E., Watt, A. J., & Mantz, S. (2010). A pilot study of combined working memory and inhibition training for children with AD/HD. *Attention Deficit and Hyperactivity Disorders*, 2(1), 31-42. <https://doi.org/10.1007/s12402-009-0017-z>
- Jolles, D. D., Buchem, M. A., Rombouts, S. A. R. B., & Crone, E. A. (2012). Practice effects in the developing brain : A pilot study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.001>
- Jolles, D. D., & Crone, E. A. (2012). Training the developing brain : A neurocognitive perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 76. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00076>
- Jones, D. T., & Graff-Radford, J. (2021). Executive Dysfunction and the Prefrontal Cortex. *Continuum (Minneapolis, Minn.)*, 27(6), 1586-1601. <https://doi.org/10.1212/CON.0000000000001009>
- José, R.-G., Samuel, A.-S., & Isabel, M.-M. (2020). Neuropsychology of executive functions in patients with focal lesion in the prefrontal cortex : A systematic review. *Brain and Cognition*, 146, 105633. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2020.105633>
- Josefsson, T., & Broberg, A. (2011). Meditators and non-meditators on sustained and executive attentional performance. *Mental Health, Religion & Culture*, 14(3), 291-309. <https://doi.org/10.1080/13674670903578621>
- Joss, D., Lazar, S. W., & Teicher, M. H. (2020). Effects of a mindfulness based behavioral intervention for young adults with childhood maltreatment history on hippocampal morphometry : A pilot MRI study with voxel-based morphometry. *Psychiatry research. Neuroimaging*, 301, 111087. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2020.111087>
- Jourdheuil, R., & Petit, E. (2015). Moral emotions and prosocial behaviors : A review. *Revue d'économie politique*, 125(4), 499-525.
- Juneau, C., Shankland, R., Knäuper, B., & Dambrun, M. (2021). Mindfulness and equanimity moderate approach/avoidance motor responses. *Cognition and Emotion*, 35(6), 1085-1098. <https://doi.org/10.1080/02699931.2021.1927674>
- Jurigova, B. G., Gerdes, M. R., Anguera, J. A., & Marco, E. J. (2021). Sustained benefits of cognitive training in children with inattention, three-year follow-up. *PLOS ONE*, 16(2), e0246449. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246449>
- Kabat-Zinn, J. (1982). An outpatient program in behavioral medicine for chronic pain patients based on the practice of mindfulness meditation : Theoretical considerations and preliminary results. *General Hospital Psychiatry*, 4(1), 33-47. [https://doi.org/10.1016/0163-8343\(82\)90026-3](https://doi.org/10.1016/0163-8343(82)90026-3)
- Kabat-Zinn, J. (1994). *Wherever you go, there you are : Mindfulness meditation in everyday life*. Hyperion.
- Kabat-Zinn, J. (2003). Mindfulness-Based Interventions in Context : Past, Present, and Future. *Clinical Psychology: Science and Practice*, 10(2), 144-156. <https://doi.org/10.1093/clipsy.bpg016>
- Kahneman, D. (2012). *Système 1, système 2 : Les deux vitesses de la pensée*. Flammarion.
- Kaiser Greenland, S. (2014). *Un coeur tranquille et sage (L (Trad. ). L. Arènes. Bury, Trad.)*.
- Kamkar, N. H., & Morton, J. B. (2017). CanDiD: A Framework for Linking Executive Function and Education. *Frontiers in Psychology*, 8, 1187. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01187>
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2000). Working-memory capacity, proactive interference, and divided attention : Limits on long-term memory retrieval. *J. Exp. Psychol*, 26, 336-358.



- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence : An individual-differences perspective. *Psychon. Bull. Rev.*, *9*, 637-671.
- Kang, J. I., Park, C. I., Sohn, S., Kim, H. W., Namkoong, K., & Kim, S. J. (2015). Circadian preference and trait impulsivity, sensation-seeking and response inhibition in healthy young adults. *Chronobiology International*, *32*(2), 235-241. <https://doi.org/10.3109/07420528.2014.965313>
- Kang, Y., Rahrig, H., Eichel, K., Niles, H. F., Rocha, T., Lepp, N. E., Gold, J., & Britton, W. B. (2018). Gender differences in response to a school-based mindfulness training intervention for early adolescents. *Journal of School Psychology*, *68*, 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2018.03.004>
- Kappes, C., & Bermeitinger, C. (2016). The Emotional Stroop as an Emotion Regulation Task. *Experimental Aging Research*, *42*(2), 161-194. <https://doi.org/10.1080/0361073X.2016.1132890>
- Karbach, J. (2008). *Potential and limits of executive control training : Age differences in the near and far transfer of task-switching training.*
- 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. (2016). *Cognitive Training : An Overview of Features and Applications.* [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4_1)
- Karbach, J., Könen, T., & Spengler, M. (2017). Who Benefits the Most ? Individual Differences in the Transfer of Executive Control Training Across the Lifespan. *Journal of Cognitive Enhancement*, *1*(4), 394-405. <https://doi.org/10.1007/s41465-017-0054-z>
- Karbach, J., & Kray, J. (2009). How useful is executive control training ? Age differences in near and far transfer of task-switching training : Transfer of task-switching training. *Developmental Science*, *12*(6), 978-990. <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*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00048>
- Karbach, J., Strobach, T., & Schubert, T. (2015). Adaptive working-memory training benefits reading, but not mathematics in middle childhood. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, *21*(3), 285-301. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.899336>
- Karbach, J., & Unger, K. (2014a). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, *5*, 390. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00390>
- Karbach, J., & Unger, K. (2014b). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2014.00390>
- Karlsson, I. K., Gatz, M., Arpawong, T. E., Dahl Aslan, A. K., & Reynolds, C. A. (2021). The dynamic association between body mass index and cognition from midlife through late-life, and the effect of sex and genetic influences. *Scientific Reports*, *11*(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86667-4>
- Karr, J. E., Areshenkoff, C. N., Rast, P., Hofer, S. M., Iverson, G. L., & Garcia-Barrera, M. A. (2018). The Unity and Diversity of Executive Functions : A Systematic Review and Re-Analysis of Latent Variable Studies. *Psychological bulletin*, *144*(11), 1147-1185. <https://doi.org/10.1037/bul0000160>
- Kasparbauer, A.-M., Merten, N., Aichert, D. S., Wöstmann, N., Meindl, T., Rujescu, D., & Ettinger, U. (2015). Association of COMT and SLC6A3 polymorphisms with impulsivity, response inhibition and brain function. *Cortex*, *71*, 219-231. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.07.002>
- Kassai, R., Futo, J., Demetrovics, Z., & Takacs, Z. K. (2019). A meta-analysis of the experimental evidence on the near-and far-transfer effects among children's executive function skills. *Psychological Bulletin*, *145*(2), 165-188. <https://doi.org/10.1037/bul0000180>
- Kattner, F. (2021). Transfer of working memory training to the inhibitory control of auditory distraction. *Psychological Research*, *85*(8), 3152-3166. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01468-0>

- Katz, B., Jaeggi, S., Buschkuhl, M., Stegman, A., & Shah, P. (2014). Differential effect of motivational features on training improvements in school-based cognitive training. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00242>
- Kayo, A. R., Wimala, A. R., Angela, N., & Rashid, I. binti A. (2012). Random blood glucose level as predictor of cognitive impairment in elderly. *Universa Medicina*, *31*(2), Art. 2. <https://doi.org/10.18051/UnivMed.2012.v31.131-138>
- Kelada, S. N., Costa-Mallen, P., Checkoway, H., Carlson, C. S., Weller, T.-S., Swanson, P. D., Franklin, G. M., Longstreth, W. T., Afsharnejad, Z., & Costa, L. G. (2005). Dopamine transporter (SLC6A3) 5' region haplotypes significantly affect transcriptional activity in vitro but are not associated with Parkinson's disease. *Pharmacogenetics and Genomics*, *15*(9), 659-668. <https://doi.org/10.1097/01.fpc.0000170917.04275.d6>
- Kelley, P., Lockley, S. W., Foster, R. G., & Kelley, J. (2015). Synchronizing education to adolescent biology : 'Let teens sleep, start school later'. *Learning, Media and Technology*, *40*(2), 210-226. <https://doi.org/10.1080/17439884.2014.942666>
- Kelly, A. M. C., Hester, R., Murphy, K., Javitt, D. C., Foxe, J. J., & Garavan, H. (2004). Prefrontal-subcortical dissociations underlying inhibitory control revealed by event-related fMRI. *The European Journal of Neuroscience*, *19*(11), 3105-3112. <https://doi.org/10.1111/j.0953-816X.2004.03429.x>
- Kelly, C. L., Sünram-Lea, S. I., & Crawford, T. J. (2015). The Role of Motivation, Glucose and Self-Control in the Antisaccade Task. *PLOS ONE*, *10*(3), e0122218. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122218>
- Keng, S.-L., Smoski, M. J., & Robins, C. J. (2011). Effects of Mindfulness on Psychological Health : A Review of Empirical Studies. *Clinical psychology review*, *31*(6), 1041-1056. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2011.04.006>
- 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>
- Kerr, C. E., Josyula, K., & Littenberg, R. (2011). Developing an observing attitude : An analysis of meditation diaries in an MBSR clinical trial. *Clinical Psychology & Psychotherapy*, *18*(1), 80-93. <https://doi.org/10.1002/cpp.700>
- Khalili-Mahani, N., Assadi, A., Li, K., Mirgholami, M., Rivard, M.-E., Benali, H., Sawchuk, K., & Schutter, B. D. (2020). Reflective and Reflexive Stress Responses of Older Adults to Three Gaming Experiences In Relation to Their Cognitive Abilities : Mixed Methods Crossover Study. *JMIR Mental Health*, *7*(3), e12388. <https://doi.org/10.2196/12388>
- Khalsa, S., Rudrauf, D., Damasio, A., Davidson, R., Lutz, A., & Tranel, D. (2008). Interoceptive awareness in experienced meditators. *Psychophysiology*, *45*, 671-677. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00666.x>
- Khalsa, S., Rudrauf, D., Hassanpour, M., Davidson, R., & Tranel, D. (2020). The practice of meditation is not associated with improved interoceptive awareness of the heartbeat. *Psychophysiology*, *57*(2), e13479. <https://doi.org/10.1111/psyp.13479>
- Khoury, B., Sharma, M., Rush, S. E., & Fournier, C. (2015). Mindfulness-based stress reduction for healthy individuals : A meta-analysis. *Journal of Psychosomatic Research*, *78*(6), 519-528. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2015.03.009>
- Kiani, B., Hadianfard, H., & Mitchell, J. T. (2017). The impact of mindfulness meditation training on executive functions and emotion dysregulation in an Iranian sample of female adolescents with elevated attention-deficit/hyperactivity disorder symptoms. *Australian Journal of Psychology*, *69*(4), 273-282. <https://doi.org/10.1111/ajpy.12148>
- Kievit, R. A., Brandmaier, A. M., Ziegler, G., Harmelen, A.-L., Mooij, S. M. M., Moutoussis, M., Goodyer, I. M., Bullmore, E., Jones, P. B., Fonagy, P., Lindenberger, U., & Dolan, R. J. (2018). Developmental cognitive neuroscience using latent change score models : A tutorial and applications. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *33*, 99-117. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.11.007>

- Kievit, R. A., Lindenberger, U., Goodyer, I. M., Jones, P. B., Fonagy, P., Bullmore, E. T., Network, P., & Dolan, R. J. (2017). Mutualistic Coupling Between Vocabulary and Reasoning Supports Cognitive Development During Late Adolescence and Early Adulthood. *Psychological Science*, 28(10), 1419-1431. <https://doi.org/10.1177/0956797617710785>
- Kiken, L. G., Garland, E. L., Bluth, K., Palsson, O. S., & Gaylord, S. A. (2015). From a state to a trait : Trajectories of state mindfulness in meditation during intervention predict changes in trait mindfulness. *Personality and Individual Differences*, 81, 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.12.044>
- Killingsworth, M. A., & Gilbert, D. T. (2010). A wandering mind is an unhappy mind. *Science (New York, N.Y.)*, 330(6006), 932. <https://doi.org/10.1126/science.1192439>
- Kim, H. S., Kim, E.-K., Park, H.-K., Ahn, D.-H., Kim, M. J., & Lee, H. J. (2019). Cognitive Outcomes of Children with Very Low Birth Weight at 3 to 5 Years of Age. *Journal of Korean Medical Science*, 35(1), e4. <https://doi.org/10.3346/jkms.2020.35.e4>
- Kim, S., Nordling, J. K., Yoon, J. E., Boldt, L. J., & Kochanska, G. (2013a). Effortful Control in “Hot” and “Cool” Tasks Differentially Predicts Children’s Behavior Problems and Academic Performance. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 41(1), 43-56. <https://doi.org/10.1007/s10802-012-9661-4>
- Kim, S., Nordling, J. K., Yoon, J. E., Boldt, L. J., & Kochanska, G. (2013b). Effortful control in « hot » and « cool » tasks differentially predicts children’s behavior problems and academic performance. *J Abnorm Child Psychol*, 41(1), 43-56.
- Kim, S., Zemon, V., Cavallo, M. M., Rath, J. F., McCraty, R., & Foley, F. W. (2013). Heart rate variability biofeedback, executive functioning and chronic brain injury. *Brain Injury*, 27(2), 209-222. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.729292>
- Klauer, K. C., Schmitz, F., Teige-Mocigemba, S., & Voss, A. (2010). Understanding the role of executive control in the implicit association test : Why flexible people have small IAT effects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(3), 595-619. <https://doi.org/10.1080/17470210903076826>
- Klaus, K., Butler, K., Curtis, F., Bridle, C., & Pennington, K. (2019). The effect of ANKK1 Taq1A and DRD2 C957T polymorphisms on executive function : A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 100, 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.01.021>
- Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity : Implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 51(1), S225-239. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/018\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018))
- Klenberg, L., Närhi, V., Korkman, M., & Hokkanen, L. (2015). Examining methodological variation in response inhibition : The effects of outcome measures and task characteristics on age-related differences. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 21(5), 586-602. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.950215>
- 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>
- Knoll, L. J., Fuhrmann, D., Sakhardande, A. L., Stamp, F., Speekenbrink, M., & Blakemore, S.-J. (2016). A Window of Opportunity for Cognitive Training in Adolescence. *Psychological Science*, 27(12), 1620-1631. <https://doi.org/10.1177/0956797616671327>
- Knudsen, E. I. (2004). Sensitive Periods in the Development of the Brain and Behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(8), 1412-1425. <https://doi.org/10.1162/0898929042304796>
- Koelsch, S., Andrews-Hanna, J. R., & Skouras, S. (2022). Tormenting thoughts : The posterior cingulate sulcus of the default mode network regulates valence of thoughts and activity in the brain’s pain network during music listening. *Human Brain Mapping*, 43(2), 773-786. <https://doi.org/10.1002/hbm.25686>
- Kohls, N., Sauer, S., & Walach, H. (2009). Facets of mindfulness – Results of an online study investigating the Freiburg mindfulness inventory. *Personality and Individual Differences*, 46(2), 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2008.10.009>

- Kolb, B., & Gibb, R. (2011). Brain Plasticity and Behaviour in the Developing Brain. *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 20(4), 265-276.
- Kolk, S. M., & Rakic, P. (2022). Development of prefrontal cortex. *Neuropsychopharmacology*, 47(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01137-9>
- Kolling, N., Wittmann, M. K., Behrens, T. E. J., Boorman, E. D., Mars, R. B., & Rushworth, M. F. S. (2016). Value, search, persistence and model updating in anterior cingulate cortex. *Nature Neuroscience*, 19(10), Art. 10. <https://doi.org/10.1038/nn.4382>
- Kollins, S., Anastopoulos, A., Lachiewicz, A., FitzGerald, D., Morrissey-Kane, E., Garrett, M., Keatts, S., & Ashley-Koch, A. (2008). SNPs in Dopamine D2 Receptor Gene (DRD2) and Norepinephrine Transporter Gene (NET) Are Associated with Continuous Performance Task (CPT) Phenotypes in ADHD children and their families. *American journal of medical genetics. Part B, Neuropsychiatric genetics : the official publication of the International Society of Psychiatric Genetics*, 147B(8), 1580-1588. <https://doi.org/10.1002/ajmg.b.30876>
- Kolodny, T., Mevorach, C., & Shalev, L. (2017). Isolating response inhibition in the brain : Parietal versus frontal contribution. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 88, 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.12.012>
- Kolodny, T., Mevorach, C., Stern, P., Biderman, N., Ankaoua, M., Tsafir, S., & Shalev, L. (2020). Fronto-parietal engagement in response inhibition is inversely scaled with attention-deficit/hyperactivity disorder symptom severity. *NeuroImage. Clinical*, 25, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.102119>
- Koncz, A., Köteles, F., Demetrovics, Z., & Takacs, Z. K. (2021). Benefits of a Mindfulness-Based Intervention upon School Entry : A Pilot Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), Art. 23. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312630>
- Kondo, H., Osaka, N., & Osaka, M. (2004). Cooperation of the anterior cingulate cortex and dorsolateral prefrontal cortex for attention shifting. *NeuroImage*, 23(2), 670-679. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.06.014>
- Kotsou, I., Farnier, J., Shankland, R., Mikolajczak, M., Quoidbach, J., & Leys, C. (2022). Chapitre 6. Séance 4 – Réguler les émotions. In *Développer les compétences émotionnelles* (p. 116-135). Dunod. <https://www.cairn.info/developper-les-competences-emotionnelles--9782100823260-p-116.htm>
- Kozasa, E. H., Sato, J. R., Lacerda, S. S., Barreiros, M. A. M., Radvany, J., Russell, T. A., Sanches, L. G., Mello, L. E. A. M., & Amaro, E. (2012). Meditation training increases brain efficiency in an attention task. *NeuroImage*, 59(1), 745-749. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.06.088>
- Krain, A. L., Wilson, A. M., Arbuckle, R., Castellanos, F. X., & Milham, M. P. (2006). Distinct neural mechanisms of risk and ambiguity : A meta-analysis of decision-making. *NeuroImage*, 32(1), 477-484. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.02.047>
- Kral, T. R. A., Davis, K., Korponay, C., Hirshberg, M. J., Hoel, R., Tello, L. Y., Goldman, R. I., Rosenkranz, M. A., Lutz, A., & Davidson, R. J. (2022). Absence of structural brain changes from mindfulness-based stress reduction : Two combined randomized controlled trials. *Science Advances*, 8(20), eabk3316. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abk3316>
- Kral, T. R. A., Schuyler, B. S., Mumford, J. A., Rosenkranz, M. A., Lutz, A., & Davidson, R. J. (2018). Impact of short- and long-term mindfulness meditation training on amygdala reactivity to emotional stimuli. *NeuroImage*, 181, 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.07.013>
- Kray, J., Kipp, K. H., & Karbach, J. (2009). The development of selective inhibitory control : The influence of verbal labeling. *Acta Psychologica*, 130(1), 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.10.006>
- Kret, M., Roelofs, K., Stekelenburg, J., & de Gelder, B. (2013). Emotional signals from faces, bodies and scenes influence observers' face expressions, fixations and pupil-size. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2013.00810>
- Kristeller, J. L. (2007). Mindfulness meditation. In *Principles and practice of stress management, 3rd ed* (p. 393-427). The Guilford Press.

- Kucyi, A. (2018). Just a thought : How mind-wandering is represented in dynamic brain connectivity. *NeuroImage*, *180*, 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.07.001>
- Kukreti, R., Tripathi, S., Bhatnagar, P., Gupta, S., Chauhan, C., Kubendran, S., Janardhan Reddy, Y. C., Jain, S., & Brahmachari, S. K. (2006). Association of DRD2 gene variant with schizophrenia. *Neuroscience Letters*, *392*(1-2), 68-71. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2005.08.059>
- Kuroda, Y., Yamakawa, O., & Ito, M. (2022). Benefits of mindfulness in academic settings : Trait mindfulness has incremental validity over motivational factors in predicting academic affect, cognition, and behavior. *BMC Psychology*, *10*, 48. <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00746-3>
- Kurth, F., Zilles, K., Fox, P. T., Laird, A. R., & Eickhoff, S. B. (2010). A link between the systems : Functional differentiation and integration within the human insula revealed by meta-analysis. *Brain Structure & Function*, *214*(5-6), 519-534. <https://doi.org/10.1007/s00429-010-0255-z>
- Kuyken, W., Ball, S., Crane, C., Ganguli, P., Jones, B., Montero-Marin, J., Nuthall, E., Raja, A., Taylor, L., Tudor, K., Viner, R. M., Allwood, M., Aukland, L., Dunning, D., Casey, T., Dalrymple, N., Wilde, K. D., Farley, E.-R., Harper, J., ... Williams, J. M. G. (2022). Effectiveness and cost-effectiveness of universal school-based mindfulness training compared with normal school provision in reducing risk of mental health problems and promoting well-being in adolescence : The MYRIAD cluster randomised controlled trial. *Evidence-Based Mental Health*, *25*(3), 99-109. <https://doi.org/10.1136/ebmental-2021-300396>
- Kuyken, W., Warren, F. C., Taylor, R. S., Whalley, B., Crane, C., Bondolfi, G., Hayes, R., Huijbers, M., Ma, H., Schweizer, S., Segal, Z., Speckens, A., Teasdale, J. D., Van Heeringen, K., Williams, M., Byford, S., Byng, R., & Dalgleish, T. (2016). Efficacy of Mindfulness-Based Cognitive Therapy in Prevention of Depressive Relapse : An Individual Patient Data Meta-analysis From Randomized Trials. *JAMA Psychiatry*, *73*(6), 565-574. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2016.0076>
- Kwak, S., Kim, S.-Y., Bae, D., Hwang, W.-J., Cho, K. I. K., Lim, K.-O., Park, H.-Y., Lee, T. Y., & Kwon, J. S. (2020). Enhanced Attentional Network by Short-Term Intensive Meditation. *Frontiers in Psychology*, *10*, 3073. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03073>
- Kwon, H., Reiss, A. L., & Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*(20), 13336-13341. <https://doi.org/10.1073/pnas.162486399>
- La Marca, J. P., & O'Connor, R. E. (2016). Neurofeedback as an Intervention to Improve Reading Achievement in Students with Attention Deficit Hyperactivity Disorder, Inattentive Subtype. *Neuroregulation*, *3*(2).
- Lam, K., & Seiden, D. (2020). Effects of a Brief Mindfulness Curriculum on Self-reported Executive Functioning and Emotion Regulation in Hong Kong Adolescents. *Mindfulness*, *11*(3), 627-642. <https://doi.org/10.1007/s12671-019-01257-w>
- Lam, L. T., & Yang, L. (2007). Overweight/obesity and attention deficit and hyperactivity disorder tendency among adolescents in China. *International Journal of Obesity*, *31*(4), Art. 4. <https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0803526>
- Lanciego, J. L., Luquin, N., & Obeso, J. A. (2012). Functional Neuroanatomy of the Basal Ganglia. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, *2*(12), a009621. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a009621>
- Laneri, D., Schuster, V., Dietsche, B., Jansen, A., Ott, U., & Sommer, J. (2016). Effects of Long-Term Mindfulness Meditation on Brain's White Matter Microstructure and its Aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *7*, 254. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00254>
- Langner, R., Leiberg, S., Hoffstaedter, F., & Eickhoff, S. B. (2018). Towards a human self-regulation system : Common and distinct neural signatures of emotional and behavioural control. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *90*, 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.04.022>
- Lappin, J. S., & Eriksen, C. W. (1966). Use of a delayed signal to stop a visual reaction-time response. *Journal of Experimental Psychology*, *72*(6), 805-811.

- Lara, T., Madrid, J. A., & Correa, Á. (2014). The Vigilance Decrement in Executive Function Is Attenuated When Individual Chronotypes Perform at Their Optimal Time of Day. *PLOS ONE*, *9*(2), e88820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088820>
- Lau, M. A., Bishop, S. R., Segal, Z. V., Buis, T., Anderson, N. D., Carlson, L., Shapiro, S., Carmody, J., Abbey, S., & Devins, G. (2006). The toronto mindfulness scale : Development and validation. *Journal of Clinical Psychology*, *62*(12), 1445-1467. <https://doi.org/10.1002/jclp.20326>
- Lazar, S. W., Kerr, C. E., Wasserman, R. H., Gray, J. R., Greve, D. N., Treadway, M. T., McGarvey, M., Quinn, B. T., Dusek, J. A., Benson, H., Rauch, S. L., Moore, C. I., & Fischl, B. (2005). Meditation experience is associated with increased cortical thickness. *Neuroreport*, *16*(17), 1893-1897.
- Lee, D., Kwak, S., & Chey, J. (2019). Parallel Changes in Cognitive Function and Gray Matter Volume After Multi-Component Training of Cognitive Control (MTCC) in Adolescents. *Frontiers in Human Neuroscience*, *13*, 246. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00246>
- Lee, J., Semple, R. J., Rosa, D., & Miller, L. (2008). Mindfulness-based cognitive therapy for children : Results of a pilot study. *Journal of Cognitive Psychotherapy*, *22*(1), 15-28. <https://doi.org/10.1891/0889.8391.22.1.15>
- Lee, Y.-C., & Chao, H.-F. (2012). The role of active inhibitory control in psychological well-being and mindfulness. *Personality and Individual Differences*, *53*(5), 618-621. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2012.05.001>
- Lefavrais, P. (1967). *Test de l'alouette*. Centre de psychologie appliquée. <https://books.google.fr/books?id=SZUpOwAACAAJ>
- Leh, S. E., Petrides, M., & Strafella, A. P. (2010). The neural circuitry of executive functions in healthy subjects and Parkinson's disease. *Neuropsychopharmacology*, *35*(1), 70-85. <https://doi.org/10.1038/npp.2009.88>
- 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.
- Lengacher, C. A., Gruss, L. F., Kip, K. E., Reich, R. R., Chauca, K. G., Moscoso, M. S., Joshi, A., Tinsley, S., Shani, B., Cousin, L., Khan, C. P., Goodman, M., & Park, J. Y. (2021). Mindfulness-based stress reduction for breast cancer survivors (MBSR(BC)) : Evaluating mediators of psychological and physical outcomes in a large randomized controlled trial. *Journal of Behavioral Medicine*, *44*(5), 591-604. <https://doi.org/10.1007/s10865-021-00214-0>
- Lenroot, R. K., Gogtay, N., Greenstein, D. K., Wells, E. M., Wallace, G. L., Clasen, L. S., & Evans, A. C. (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. *Neuroimage*, *36*(4), 1065-1073.
- Leonard, C. M., Towler, S., Welcome, S., & Chiarello, C. (2009). Paracingulate asymmetry in anterior and midcingulate cortex : Sex differences and the effect of measurement technique. *Brain Structure & Function*, *213*(6), 553-569. <https://doi.org/10.1007/s00429-009-0210-z>
- Leong, A. Y. C., Yong, M. H., & Lin, M.-H. (2022). The effect of strategy game types on inhibition. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-021-01632-0>
- Leong, J. K., MacNiven, K. H., Samanez-Larkin, G. R., & Knutson, B. (2018). Distinct neural circuits support incentivized inhibition. *NeuroImage*, *178*, 435-444. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.05.055>
- Leroux, G., Lubin, A., Houdé, O., & Lanoë, C. (2013). How to best train children and adolescents for fMRI? Meta-analysis of the training methods in developmental neuroimaging. *Neuroeducation*, *2*(1), 44-70. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20130201.44>
- Leshem, R., De Fano, A., & Ben-Soussan, T. D. (2020). The Implications of Motor and Cognitive Inhibition for Hot and Cool Executive Functions : The Case of Quadrato Motor Training. *Frontiers in Psychology*, *11*, 940. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00940>
- Levenson, C. B. (2018). Chapitre II. D'où vient le bouddhisme ? *Que sais-je?*, *4*, 18-28.
- Levin, I., Xue, G., Weller, J., Reimann, M., Lauriola, M., & Bechara, A. (2012). A Neuropsychological Approach to Understanding Risk-Taking for Potential Gains and Losses. *Frontiers in Neuroscience*, *6*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnins.2012.00015>

- Lewis, C. R., Henderson-Smith, A., Breitenstein, R. S., Sowards, H. A., Piras, I. S., Huentelman, M. J., Doane, L. D., & Lemery-Chalfant, K. (2019). Dopaminergic gene methylation is associated with cognitive performance in a childhood monozygotic twin study. *Epigenetics, 14*(3), 310-323. <https://doi.org/10.1080/15592294.2019.1583032>
- Li, C. R., Huang, C., Yan, P., Bhagwagar, Z., Milivojevic, V., & Sinha, R. (2008). Neural Correlates of Impulse Control During Stop Signal Inhibition in Cocaine-Dependent Men. *Neuropsychopharmacology, 33*(8), Art. 8. <https://doi.org/10.1038/sj.npp.1301568>
- Li, C. R., Zhang, S., Duann, J.-R., Yan, P., Sinha, R., & Mazure, C. M. (2009). Gender Differences in Cognitive Control : An Extended Investigation of the Stop Signal Task. *Brain Imaging and Behavior, 3*(3), 262-276. <https://doi.org/10.1007/s11682-009-9068-1>
- Li, M. J., Black, D. S., & Garland, E. L. (2016). The Applied Mindfulness Process Scale (AMPS) : A process measure for evaluating mindfulness-based interventions. *Personality and individual differences, 93*, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2015.10.027>
- Li, W., Xie, K., Ngetich, R. K., Zhang, J., Jin, Z., & Li, L. (2021). Inferior Frontal Gyrus-Based Resting-State Functional Connectivity and Medium Dispositional Use of Reappraisal Strategy. *Frontiers in Neuroscience, 15*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2021.681859>
- Lieberman, M. D., Jarcho, J. M., & Satpute, A. B. (2004). Evidence-based and intuition-based self-knowledge : An fMRI study. *Journal of Personality and Social Psychology, 87*(4), 421-435. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.87.4.421>
- Lilja, J. L., Lundh, L.-G., Josefsson, T., & Falkenström, F. (2013). Observing as an Essential Facet of Mindfulness : A Comparison of FFMQ Patterns in Meditating and Non-Meditating Individuals. *Mindfulness, 4*(3), 203-212. <https://doi.org/10.1007/s12671-012-0111-8>
- Lin, C.-H., Chaudhuri, K. R., Fan, J.-Y., Ko, C.-I., Rizos, A., Chang, C.-W., Lin, H.-I., & Wu, Y.-R. (2017). Depression and Catechol-O-methyltransferase (COMT) genetic variants are associated with pain in Parkinson's disease. *Scientific Reports, 7*(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06782-z>
- Lindahl, J. R., Britton, W. B., Cooper, D. J., & Kirmayer, L. J. (2021). Challenging and Adverse Meditation Experiences : Toward a Person-Centered Approach. In M. Farias, D. Brazier, & M. Lalljee (Éds.), *The Oxford Handbook of Meditation* (p. 839-864). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198808640.013.51>
- Linden, W. (1973). Practicing of meditation by school children and their levels of field dependence-independence, test anxiety, and reading achievement. *Journal of Consulting and Clinical Psychology, 41*(1), 139-143. <https://doi.org/10.1037/h0035638>
- Linzarini, A., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Cognitive control outside of conscious awareness. *Consciousness and Cognition, 53*, 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.06.014>
- Lipnevich, A. A., Credè, M., Hahn, E., Spinath, F. M., Roberts, R. D., & Preckel, F. (2017). How distinctive are morningness and eveningness from the Big Five factors of personality? A meta-analytic investigation. *Journal of Personality and Social Psychology, 112*(3), 491-509. <https://doi.org/10.1037/pspp0000099>
- Liu, L. (2020). Examining the Usefulness of Mindfulness Practices in Managing School Leader Stress During COVID-19 Pandemic. *Journal of School Administration Research and Development, 5*(S1), Art. S1. <https://doi.org/10.32674/jsard.v5iS1.2692>
- 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*(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/srep14200>
- Liu, W., Peeters, N., Fernández, G., & Kohn, N. (2020). Common neural and transcriptional correlates of inhibitory control underlie emotion regulation and memory control. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 15*(5), 523-536. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaa073>
- Liu, X., Xiao, R., & Tang, W. (2021). The Impact of School-Based Mindfulness Intervention on Bullying Behaviors Among Teenagers : Mediating Effect of Self-Control. *Journal of Interpersonal Violence, 8862605211052047*. <https://doi.org/10.1177/08862605211052047>

- Liu, Z., Zaid, M., Hisamatsu, T., Tanaka, S., Fujiyoshi, A., Miyagawa, N., Ito, T., Kadota, A., Tooyama, I., Miura, K., & Ueshima, H. (2020). Elevated Fasting Blood Glucose Levels Are Associated With Lower Cognitive Function, With a Threshold in Non-Diabetic Individuals : A Population-Based Study. *Journal of Epidemiology*, *30*(3), 121-127. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20180193>
- Logan, G. D., & Cowan, W. B. (1984). On the ability to inhibit thought and action : A theory of an act of control. *Psychological Review*, *91*(3), 295.
- Logan, G. D., Schachar, R. J., & Tannock, R. (1997). Impulsivity and Inhibitory Control. *Psychological Science*, *8*(1), 60-64. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1997.tb00545.x>
- Loizzo, J. (2014). Meditation research, past, present, and future : Perspectives from the Nalanda contemplative science tradition. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1307*, 43-54. <https://doi.org/10.1111/nyas.12273>
- Loucks, E. B., Gilman, S. E., Britton, W. B., Gutman, R., Eaton, C. B., & Buka, S. L. (2016). Associations of Mindfulness with Glucose Regulation and Diabetes. *American journal of health behavior*, *40*(2), 258-267. <https://doi.org/10.5993/AJHB.40.2.11>
- Lozano Gutiérrez, A., & Ostrosky, F. (2012). Effect of Socioeconomic Status in Inhibitory Control During Preschool Age. *Acta de Investigación Psicológica*, *2*(1), 521-531.
- Lu, H., Song, Y., Xu, M., Wang, X., Li, X., & Liu, J. (2014). The brain structure correlates of individual differences in trait mindfulness : A voxel-based morphometry study. *Neuroscience*, *272*, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.04.051>
- Luciana, M., & Collins, P. F. (2012). Incentive Motivation, Cognitive Control, and the Adolescent Brain : Is It Time for a Paradigm Shift? *Child development perspectives*, *6*(4), 392-399. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2012.00252.x>
- Luders, E., Kurth, F., Mayer, E. A., Toga, A. W., Narr, K. L., & Gaser, C. (2012). The Unique Brain Anatomy of Meditation Practitioners : Alterations in Cortical Gyrification. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 34. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00034>
- Luna, B. (2009). Developmental changes in cognitive control through adolescence. *Advances in Child Development and Behavior*, *37*, 233-278.
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of Cognitive Processes From Late Childhood to Adulthood. *Child Development*, *75*(5), 1357-1372. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00745.x>
- Luna, B., Marek, S., Larsen, B., Tervo-Clemmens, B., & Chahal, R. (2015). An integrative model of the maturation of cognitive control. *Annual Review of Neuroscience*, *38*, 151-170. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071714-034054>
- Luna, B., & Sweeney, J. A. (2004). The Emergence of Collaborative Brain Function : fMRI Studies of the Development of Response Inhibition. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1021*(1), 296-309. <https://doi.org/10.1196/annals.1308.035>
- Luna, B., & Wright, C. (2016). Adolescent brain development : Implications for the juvenile criminal justice system. In *APA handbook of psychology and juvenile justice* (p. 91-116). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/14643-005>
- Lundqvist, D., & Ohman, A. (2005). Emotion regulates attention : The relation between facial configurations, facial emotion, and visual attention. *Visual Cognition*, *12*(1), 51-84. <https://doi.org/10.1080/13506280444000085>
- Lutz, A., Dunne, J. D., & Davidson, R. J. (2007). Meditation and the Neuroscience of Consciousness. In P. D. Zelazo, M. Moscovitch, & E. Thompson (Éds.), *Cambridge Handbook of Consciousness* (p. 19-497). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lutz, A., Slagter, H. A., Dunne, J. D., & Davidson, R. J. (2008). Attention regulation and monitoring in meditation. *Trends in cognitive sciences*, *12*(4), 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.01.005>
- Ly, K. H., Trüschel, A., Jarl, L., Magnusson, S., Windahl, T., Johansson, R., Carlbring, P., & Andersson, G. (2014). Behavioural activation versus mindfulness-based guided self-help treatment administered through a smartphone application : A randomised controlled trial. *BMJ Open*, *4*(1), e003440. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2013-003440>



- Lyons, K. E., & DeLange, J. (2016). Mindfulness Matters in the Classroom : The Effects of Mindfulness Training on Brain Development and Behavior in Children and Adolescents. In K. A. Schonert-Reichl & R. W. Roeser (Éds.), *Handbook of Mindfulness in Education : Integrating Theory and Research into Practice* (p. 271-283). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3506-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3506-2_17)
- Mackey, A. P., Hill, S. S., Stone, S. I., & Bunge, S. A. (2011). Differential effects of reasoning and speed training in children. *Developmental Science*, *14*(3), 582-590. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01005.x>
- MacKillop, J., & Anderson, E. J. (2007). Further Psychometric Validation of the Mindful Attention Awareness Scale (MAAS). *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, *29*(4), 289-293. <https://doi.org/10.1007/s10862-007-9045-1>
- MacLean, K. A., Ferrer, E., Aichele, S. R., Bridwell, D. A., Zanesco, A. P., Jacobs, T. L., & Saron, C. D. (2010). Intensive meditation training improves perceptual discrimination and sustained attention. *Psychological Science*, *21*(6), 829-839. <https://doi.org/10.1177/0956797610371339>
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect : An integrative review. *Psychological Bulletin*, *109*(2), 163-203. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.109.2.163>
- MacLeod, C. M., Dodd, M. D., Sheard, E. D., Wilson, D. E., & Bibi, U. (2003). In opposition to inhibition. In *The psychology of learning and motivation : Advances in research and theory*, Vol. 43 (p. 163-214). Elsevier Science.
- Madole, J. W., & Harden, K. P. (2022). Building Causal Knowledge in Behavior Genetics. *Behavioral and Brain Sciences*, 1-76. <https://doi.org/10.1017/S0140525X22000681>
- Maia, T. V., & Frank, M. J. (2011). From reinforcement learning models to psychiatric and neurological disorders. *Nature Neuroscience*, *14*(2), 154-162. <https://doi.org/10.1038/nn.2723>
- Maizey, L., Evans, C. J., Muhlert, N., Verbruggen, F., Chambers, C. D., & Allen, C. P. G. (2020). Cortical and subcortical functional specificity associated with response inhibition. *NeuroImage*, *220*, 117110. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117110>
- Mak, C., Whittingham, K., Cunnington, R., & Boyd, R. N. (2018). Efficacy of mindfulness-based interventions for attention and executive function in children and adolescents—A systematic review. *Mindfulness*, *9*(1), 59-78.
- Malinowski, P., & Shalamanova, L. (2017). Meditation and Cognitive Ageing : The Role of Mindfulness Meditation in Building Cognitive Reserve. *Journal of Cognitive Enhancement*, *1*(2), 96-106. <https://doi.org/10.1007/s41465-017-0022-7>
- Malkki, M., & Petersdorf, E. W. (2012). Genotyping of Single Nucleotide Polymorphisms by 5' Nuclease Allelic Discrimination. *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*, *882*, 10.1007/978-1-61779-842-9\_10. [https://doi.org/10.1007/978-1-61779-842-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-61779-842-9_10)
- Mangin, J.-F., Auzias, G., Coulon, O., Sun, Z. Y., Rivière, D., & Régis, J. (2015). Sulci as Landmarks. In *Brain Mapping : An Encyclopedic Reference* (Vol. 2, p. 45-52). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397025-1.00198-6>
- Mangin, J.-F., Jouvent, E., & Cachia, A. (2010). In-vivo measurement of cortical morphology : Means and meanings. *Current opinion in neurology*, *23*, 359-367. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e32833a0afc>
- Mangin, J.-F., Le Guen, Y., Labra, N., Grigis, A., Frouin, V., Guevara, M., Fischer, C., Rivière, D., Hopkins, W. D., Régis, J., & Sun, Z. Y. (2019). "Plis de passage" Deserve a Role in Models of the Cortical Folding Process. *Brain Topography*, *32*(6), 1035-1048. <https://doi.org/10.1007/s10548-019-00734-8>
- Manitt, C., Eng, C., Pokinko, M., Ryan, R. T., Torres-Berrío, A., Lopez, J. P., Yogendran, S. V., Daubaras, M. J. J., Grant, A., Schmidt, E. R. E., Tronche, F., Krimpenfort, P., Cooper, H. M., Pasterkamp, R. J., Kolb, B., Turecki, G., Wong, T. P., Nestler, E. J., Giros, B., & Flores, C. (2013). Dcc orchestrates the development of the prefrontal cortex during adolescence and is altered in psychiatric patients. *Translational Psychiatry*, *3*(12), e338. <https://doi.org/10.1038/tp.2013.105>
- Manocha, R. (2000). Why meditation? *Australian Family Physician*, *29*(12), 1135-1138.

- Mansouri, F. A., Fehring, D. J., Gaillard, A., Jaberzadeh, S., & Parkinson, H. (2016). Sex dependency of inhibitory control functions. *Biology of Sex Differences*, 7, 11. <https://doi.org/10.1186/s13293-016-0065-y>
- Maran, A., Lomas, J., Macdonald, I. A., & Amiel, S. A. (1995). Lack of preservation of higher brain function during hypoglycaemia in patients with intensively-treated IDDM. *Diabetologia*, 38(12), 1412-1418. <https://doi.org/10.1007/BF00400601>
- Marchand, W. R. (2014). Neural mechanisms of mindfulness and meditation : Evidence from neuroimaging studies. *World Journal of Radiology*, 6(7), 471. <https://doi.org/10.4329/wjr.v6.i7.471>
- Marcovitch, S., O'Brien, M., Calkins, S. D., Leerkes, E. M., Weaver, J. M., & Levine, D. W. (2015). A longitudinal assessment of the relation between executive function and theory of mind at 3, 4, and 5 years. *Cognitive Development*, 33, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2014.07.001>
- Marioni, R. E., Yang, J., Dykiert, D., Möttus, R., Campbell, A., Davies, G., Hayward, C., Porteous, D. J., Visscher, P. M., & Deary, I. J. (2016). Assessing the genetic overlap between BMI and cognitive function. *Molecular Psychiatry*, 21(10), Art. 10. <https://doi.org/10.1038/mp.2015.205>
- Marusak, H. A., Elrahal, F., Peters, C. A., Kundu, P., Lombardo, M. V., Calhoun, V. D., Goldberg, E. K., Cohen, C., Taub, J. W., & Rabinak, C. A. (2018). Mindfulness and dynamic functional neural connectivity in children and adolescents. *Behavioural brain research*, 336, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2017.09.010>
- Mascheretti, S., Perdue, M. V., Feng, B., Andreola, C., Dionne, G., Jasińska, K. K., Pugh, K. R., Grigorenko, E. L., & Landi, N. (2021). From BDNF to Reading : Neural Activation and Phonological Processing as Multiple Mediators. *Behavioural brain research*, 396, 112859. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112859>
- Masselin-Dubois, A. (2016). Thérapie d'acceptation et d'engagement (ACT) et Mindfulness, un modèle de flexibilité psychologique pour la douleur chronique. *Douleurs : Evaluation - Diagnostic - Traitement*, 17(5), 233-251. <https://doi.org/10.1016/j.douler.2016.08.003>
- Mathieu, R. (2019). Chapitre III. La religion taoïste et son évolution historique. *Que sais-je?*, 76-118.
- Matiz, A., Fabbro, F., Paschetto, A., Cantone, D., Paolone, A. R., & Crescentini, C. (2020). Positive Impact of Mindfulness Meditation on Mental Health of Female Teachers during the COVID-19 Outbreak in Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6450. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186450>
- Mattay, V. S., Goldberg, T. E., Fera, F., Hariri, A. R., Tessitore, A., Egan, M. F., Kolachana, B., Callicott, J. H., & Weinberger, D. R. (2003). Catechol O-methyltransferase val158-met genotype and individual variation in the brain response to amphetamine. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(10), 6186-6191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0931309100>
- Maynard, B. R., Solis, M. R., Miller, V. L., & Brendel, K. E. (2017). Mindfulness-based interventions for improving cognition, academic achievement, behavior, and socioemotional functioning of primary and secondary school students. *Campbell Systematic Reviews*, 13(1), 1-144. <https://doi.org/10.4073/CSR.2017.5>
- Mazeau, M. (2009). *Neuropsychologie et troubles des apprentissages : Du symptôme à la rééducation*. Masson.
- McDowd, J. M. (2007). An overview of attention : Behavior and brain. *Journal of Neurologic Physical Therapy: JNPT*, 31(3), 98-103. <https://doi.org/10.1097/NPT.0b013e31814d7874>
- McIntyre, L. L., Blacher, J., & Baker, B. L. (2006). The transition to school : Adaptation in young children with and without intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research*, 50(5), 349-361. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00783.x>
- McMahan, D., & Braun, E. (2017). *Meditation, Buddhism, and science*. Oxford University Press.
- McNay, E. C., McCarty, R. C., & Gold, P. E. (2001). Fluctuations in brain glucose concentration during behavioral testing : Dissociations between brain areas and between brain and blood.

- Neurobiology of Learning and Memory*, 75(3), 325-337.  
<https://doi.org/10.1006/nlme.2000.3976>
- Mehling, W. E., Gopisetty, V., Daubenmier, J., Price, C. J., Hecht, F. M., & Stewart, A. (2009). Body Awareness : Construct and Self-Report Measures. *PLOS ONE*, 4(5), e5614.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005614>
- Mehsen, V., Morag, L., Chesta, S., Cleaton, K., & Burgos, H. (2021). Hot Executive Function Assessment Instruments in Preschool Children : A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), 95. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010095>
- Menezes, C. B., & Bizarro, L. (2015). Effects of focused meditation on difficulties in emotion regulation and trait anxiety. *Psychology & Neuroscience*, 8(3), 350.
- Menu, I., Rezende, G., Le Stanc, L., Borst, G., & Cachia, A. (2022). Inhibitory control training on executive functions of children and adolescents : A latent change score model approach. *Cognitive Development*, 64, 101231. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2022.101231>
- Mergenthaler, P., Lindauer, U., Dienel, G. A., & Meisel, A. (2013). Sugar for the brain : The role of glucose in physiological and pathological brain function. *Trends in neurosciences*, 36(10), 587-597. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.07.001>
- Metcalfe, J., & Mischel, W. (1999). A hot/cool-system analysis of delay of gratification : Dynamics of willpower. *Psychological Review*, 106(1), 3-19. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.106.1.3>
- Mevel, K., Borst, G., Poirel, N., Simon, G., Orliac, F., Etard, O., & De Neys, W. (2019). Developmental frontal brain activation differences in overcoming heuristic bias. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 117, 111-121.  
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.03.004>
- Mevel, K., Poirel, N., Rossi, S., Cassotti, M., Simon, G., Houdé, O., & De Neys, W. (2015). Bias detection : Response confidence evidence for conflict sensitivity in the ratio bias task. *Journal of Cognitive Psychology*, 27(2), 227-237. <https://doi.org/10.1080/20445911.2014.986487>
- Meyer, K. N., Santillana, R., Miller, B., Clapp, W., Way, M., Bridgman-Goines, K., & Sheridan, M. A. (2020). Computer-based inhibitory control training in children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD) : Evidence for behavioral and neural impact. *PLoS One*, 15(11), e0241352. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241352>
- Meyer-Lindenberg, A., Kohn, P. D., Kolachana, B., Kippenhan, S., McInerney-Leo, A., Nussbaum, R., Weinberger, D. R., & Berman, K. F. (2005). Midbrain dopamine and prefrontal function in humans : Interaction and modulation by COMT genotype. *Nature Neuroscience*, 8(5), 594-596.  
<https://doi.org/10.1038/nn1438>
- Micha, R., Rogers, P., & Nelson, M. (2011). Glycaemic index and glycaemic load of breakfast predict cognitive function and mood in school children : A randomised controlled trial. *The British journal of nutrition*, 106, 1552-1561. <https://doi.org/10.1017/S0007114511002303>
- Midal, F. (2021). Introduction. *Que sais-je?*, 3, 3-14.
- Migliorini, R., Moore, E. M., Glass, L., Infante, M. A., Tapert, S. F., Jones, K. L., & Riley, E. P. (2015). Anterior cingulate cortex surface area relates to behavioral inhibition in adolescents with and without heavy prenatal alcohol exposure. *Behavioural Brain Research*, 292, 26-35.  
<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.05.037>
- Millan, M. J., Agid, Y., Brüne, M., Bullmore, E. T., Carter, C. S., Clayton, N. S., Connor, R., Davis, S., Deakin, B., DeRubeis, R. J., Dubois, B., Geyer, M. A., Goodwin, G. M., Gorwood, P., Jay, T. M., Joëls, M., Mansuy, I. M., Meyer-Lindenberg, A., Murphy, D., ... Young, L. J. (2012). Cognitive dysfunction in psychiatric disorders : Characteristics, causes and the quest for improved therapy. *Nature Reviews. Drug Discovery*, 11(2), 141-168. <https://doi.org/10.1038/nrd3628>
- Millner, A. J., Jaroszewski, A. C., Chamarthi, H., & Pizzagalli, D. A. (2012). Behavioral and electrophysiological correlates of training-induced cognitive control improvements. *NeuroImage*, 63(2), 742-753. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.07.032>
- Mills, K. L., Goddings, A.-L., Clasen, L. S., Giedd, J. N., & Blakemore, S.-J. (2014). The developmental mismatch in structural brain maturation during adolescence. *Developmental Neuroscience*, 36(3-4), 147-160. <https://doi.org/10.1159/000362328>

- Mink, J. (2003). The basal ganglia and involuntary movements : Impaired inhibition of competing motor patterns. *Arch. Neurol*, *60*, 1365-1368.
- Mink, J. W. (1996). The basal ganglia : Focused selection and inhibition of competing motor programs. *Prog. Neurobiol*, *50*, 381-425.
- Mink, J. W. (2018). Basal Ganglia Mechanisms in Action Selection, Plasticity, and Dystonia. *European journal of paediatric neurology : EJPN : official journal of the European Paediatric Neurology Society*, *22*(2), 225-229. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2018.01.005>
- Mischel, W. (2014). *The Marshmallow Test : Mastering self-control*. Little, Brown and Co.
- Mitchell, E. A., Robinson, E., Clark, P. M., Becroft, D. M. O., Glavish, N., Pattison, N. S., Pryor, J. E., Thompson, J. M. D., & Wild, C. J. (2004). Maternal nutritional risk factors for small for gestational age babies in a developed country : A case-control study. *Archives of Disease in Childhood. Fetal and Neonatal Edition*, *89*(5), F431-435. <https://doi.org/10.1136/adc.2003.036970>
- 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>
- Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., & others. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(7), 2693-2698.
- Montag, C., Weber, B., Fliessbach, K., Elger, C., & Reuter, M. (2009). The BDNF Val66Met polymorphism impacts parahippocampal and amygdala volume in healthy humans : Incremental support for a genetic risk factor for depression. *Psychological Medicine*, *39*(11), 1831-1839. <https://doi.org/10.1017/S0033291709005509>
- Montero-Marin, J., Allwood, M., Ball, S., Crane, C., Wilde, K. D., Hinze, V., Jones, B., Lord, L., Nuthall, E., Raja, A., Taylor, L., Tudor, K., Team, M., Blakemore, S.-J., Byford, S., Dalglish, T., Ford, T., Greenberg, M. T., Ukoumunne, O. C., ... Kuyken, W. (2022). School-based mindfulness training in early adolescence : What works, for whom and how in the MYRIAD trial? *Evidence-Based Mental Health*, *25*(3), 117-124. <https://doi.org/10.1136/ebmental-2022-300439>
- Moore, A., Gruber, T., Derose, J., & Malinowski, P. (2012). Regular, brief mindfulness meditation practice improves electrophysiological markers of attentional control. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2012.00018>
- Moore, A., & Malinowski, P. (2009). Meditation, mindfulness and cognitive flexibility. *Consciousness and Cognition*, *18*(1), 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2008.12.008>
- Morawetz, C., Bode, S., Baudewig, J., Kirilina, E., & Heekeren, H. R. (2016). Changes in Effective Connectivity Between Dorsal and Ventral Prefrontal Regions Moderate Emotion Regulation. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *26*(5), 1923-1937. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv005>
- Morishita, H., & Hensch, T. K. (2008). Critical period revisited : Impact on vision. *Current Opinion in Neurobiology*, *18*(1), 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.05.009>
- Mueser, K. T., Salyers, M. P., & Mueser, P. R. (2001). A Prospective Analysis of Work in Schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, *27*(2), 281-296. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.schbul.a006874>
- Münch, M., Knoblauch, V., Blatter, K., Schroder, C., Schnitzler, C., & Krauchi, K. (2005). Agerelated attenuation of the evening circadian arousal signal in humans. *Neurobiology of Aging*, *26*, 1307-1319.
- Muraven, M., & Baumeister, R. F. (2000). Self-regulation and depletion of limited resources : Does self-control resemble a muscle? *Psychological Bulletin*, *126*(2), 247-259. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.2.247>
- Muto, V., Jaspas, M., Meyer, C., Kussé, C., Chellappa, S. L., Degueldre, C., Balteau, E., Shaffii-Le Bourdieu, A., Luxen, A., Middleton, B., Archer, S. N., Phillips, C., Collette, F., Vandewalle, G., Dijk, D.-J., & Maquet, P. (2016). Local modulation of human brain responses by circadian

- rhythmicity and sleep debt. *Science (New York, N.Y.)*, 353(6300), 687-690. <https://doi.org/10.1126/science.aad2993>
- Nabb, S. L., & Benton, D. (2006). The effect of the interaction between glucose tolerance and breakfasts varying in carbohydrate and fibre on mood and cognition. *Nutritional Neuroscience*, 9(3-4), 161-168. <https://doi.org/10.1080/10284150600955099>
- Napoli, M., Krech, P. R., & Holley, L. C. (2005). Mindfulness training for elementary school students : The attention academy. *Journal of Applied School Psychology*, 21, 99-125.
- Navarro-Haro, M. V., Modrego-Alarcón, M., Hoffman, H. G., López-Montoyo, A., Navarro-Gil, M., Montero-Marin, J., García-Palacios, A., Borao, L., & García-Campayo, J. (2019). Evaluation of a Mindfulness-Based Intervention With and Without Virtual Reality Dialectical Behavior Therapy® Mindfulness Skills Training for the Treatment of Generalized Anxiety Disorder in Primary Care : A Pilot Study. *Frontiers in Psychology*, 10, 55. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00055>
- Neal, M., Cunningham, J., Lever, I., Pezet, S., & Malcangio, M. (2003). Mechanism by which Brain-Derived Neurotrophic Factor Increases Dopamine Release from the Rabbit Retina. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 44(2), 791-798. <https://doi.org/10.1167/iovs.02-0557>
- Nederkoorn, C., Smulders, F. T. Y., Havermans, R. C., Roefs, A., & Jansen, A. (2006). Impulsivity in obese women. *Appetite*, 47(2), 253-256. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2006.05.008>
- Nelson, T. O. (1996). Consciousness and Metacognition. *American Psychologist*, 51(2), 102-116. Scopus. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.51.2.102>
- Newman, E., Jernigan, T. L., Lisdahl, K. M., Tamm, L., Tapert, S. F., Potkin, S. G., & Group, M. N. (2016). Go/No Go task performance predicts cortical thickness in the caudal inferior frontal gyrus in young adults with and without ADHD. *Brain Imaging and Behavior*, 10(3), 880-892. <https://doi.org/10.1007/s11682-015-9453-x>
- Nicolas, S. (2003). L'analyse des résultats. In *La psychologie cognitive* (p. 199-206). Armand Colin. <https://doi.org/10.3917/arco.colas.2003.01.0199>
- Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012). Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 12(2), 241-268. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0083-5>
- Nieoullon, A., & Coquerel, A. (2003). Dopamine : A key regulator to adapt action, emotion, motivation and cognition. *Current Opinion in Neurology*, 16 Suppl 2, 3-9.
- Nieratschker, V., Kiefer, C., Giel, K., Krüger, R., & Plewnia, C. (2015). The COMT Val/Met Polymorphism Modulates Effects of tDCS on Response Inhibition. *Brain Stimulation*, 8(2), 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2014.11.009>
- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology : Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 220-246. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.126.2.220>
- Nigg, J. T. (2017). Annual research review : On the relations among self-regulation, self-control, executive functioning, effortful control, cognitive control, impulsivity, risk-taking, and inhibition for developmental psychopathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 58, 361-383.
- Nkam, I., Ramoz, N., Breton, F., Mallet, J., Gorwood, P., & Dubertret, C. (2017). Impact of DRD2/ANKK1 and COMT Polymorphisms on Attention and Cognitive Functions in Schizophrenia. *PLoS ONE*, 12(1), e0170147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170147>
- Noack, H., Lövdén, M., & Schmiedek, F. (2014). On the validity and generality of transfer effects in cognitive training research. *Psychological Research*, 78(6), 773-789. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0564-6>
- Noble, K. G., Houston, S. M., Brito, N. H., Bartsch, H., Kan, E., Kuperman, J. M., Akshoomoff, N., Amaral, D. G., Bloss, C. S., Libiger, O., Schork, N. J., Murray, S. S., Casey, B. J., Chang, L., Ernst, T. M., Frazier, J. A., Gruen, J. R., Kennedy, D. N., Zijl, P. V., ... Sowell, E. R. (2015). Family Income,

- Parental Education and Brain Structure in Children and Adolescents. *Nature neuroscience*, 18(5), 773-778. <https://doi.org/10.1038/nn.3983>
- Nokes, T. J. (2009). Mechanisms of knowledge transfer. *Thinking & Reasoning*, 15(1), 1-36. <https://doi.org/10.1080/13546780802490186>
- Noone, C., Bunting, B., & Hogan, M. J. (2016). Does Mindfulness Enhance Critical Thinking? Evidence for the Mediating Effects of Executive Functioning in the Relationship between Mindfulness and Critical Thinking. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2015.02043>
- Nordahl, C. W., Dierker, D., Mostafavi, I., Schumann, C. M., Rivera, S. M., Amaral, D. G., & Van Essen, D. C. (2007). Cortical Folding Abnormalities in Autism Revealed by Surface-Based Morphometry. *The Journal of Neuroscience*, 27(43), 11725-11735. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0777-07.2007>
- Norman, A., & Pokorny, J. J. (2017). Meditation retreats : Spiritual tourism well-being interventions. *Tourism Management Perspectives*, 24, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2017.07.012>
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to Action. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro (Éds.), *Consciousness and Self-Regulation : Advances in Research and Theory Volume 4* (p. 1-18). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0629-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0629-1_1)
- Northcut, T. B. (2017). *Cultivating Mindfulness in Clinical Social Work : Narratives from Practice*. Springer.
- Northoff, G., & Bermpohl, F. (2004). Cortical midline structures and the self. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(3), 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.01.004>
- Notaras, M., Hill, R., & van den Buuse, M. (2015). The BDNF gene Val66Met polymorphism as a modifier of psychiatric disorder susceptibility : Progress and controversy. *Molecular Psychiatry*, 20(8), 916-930. <https://doi.org/10.1038/mp.2015.27>
- Oberle, E., Schonert-Reichl, K. A., Lawlor, M. S., & Thomson, K. C. (2012). Mindfulness and Inhibitory Control in Early Adolescence. *The Journal of Early Adolescence*, 32(4), 565-588. <https://doi.org/10.1177/0272431611403741>
- Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2005). The cognitive control of emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(5), 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.03.010>
- Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2007). The Neural Architecture of Emotion Regulation. In *Handbook of emotion regulation* (p. 87-109). The Guilford Press.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113.
- Ono, M., Kubik, S., & Abernathy, C. (1990). *Atlas of the cerebral sulci* (G. Thie & ed), Éds.). G. Thieme Verlag.
- Ortner, C. N. M., Kilner, S. J., & Zelazo, P. D. (2007). Mindfulness meditation and reduced emotional interference on a cognitive task. *Motivation and Emotion*, 31(4), 271-283. <https://doi.org/10.1007/s11031-007-9076-7>
- Osmont, A., Camarda, A., Habib, M., & Cassotti, M. (2021). Peers' Choices Influence Adolescent Risk-taking Especially When Explicit Risk Information is Lacking. *Journal of Research on Adolescence*, 31(2), 402-416. <https://doi.org/10.1111/jora.12611>
- Osmont, A., Cassotti, M., Agogu , M., Houd , O., & Moutier, S. (2014). Does ambiguity aversion influence the framing effect during decision making? *Psychonomic Bulletin & Review*, 22, 572-577.
- Osmont, A., Moutier, S., Simon, G., Bouhours, L., Houd , O., & Cassotti, M. (2017). How Does Explicit Versus Implicit Risk Information Influence Adolescent Risk-Taking Engagement? *Journal of Behavioral Decision Making*, 30(5), 1093-1103.
- Ospina, M. B., Bond, K., Karkhaneh, M., Tjosvold, L., Vandermeer, B., Liang, Y., Bialy, L., Hooton, N., Buscemi, N., Dryden, D. M., & Klassen, T. P. (2007). Meditation practices for health : State of the research. *Evidence Report/Technology Assessment*, 155, 1-263.

- O'Toole, S., Monks, C. P., & Tsermentseli, S. (2018a). Associations between and development of cool and hot executive functions across early childhood. *British Journal of Developmental Psychology*, *36*(1), 142-148. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12226>
- O'Toole, S., Monks, C. P., & Tsermentseli, S. (2018b). Associations between and development of cool and hot executive functions across early childhood. *The British Journal of Developmental Psychology*, *36*(1), 142-148. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12226>
- Ott, T., & Nieder, A. (2019). Dopamine and Cognitive Control in Prefrontal Cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*(3), 213-234. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.12.006>
- Owen, M. J., Lewis, S. W., & Murray, R. M. (1988). Obstetric complications and schizophrenia : A computed tomographic study. *Psychological Medicine*, *18*(2), 331-339. <https://doi.org/10.1017/s003329170000787x>
- Owens, D. S., & Benton, D. (1994). The Impact of Raising Blood Glucose on Reaction Times. *Neuropsychobiology*, *30*(2-3), 106-113. <https://doi.org/10.1159/000119146>
- Owens, J. A., Dearth-Wesley, T., Lewin, D., Gioia, G., & Whitaker, R. C. (2016). Self-Regulation and Sleep Duration, Sleepiness, and Chronotype in Adolescents. *Pediatrics*, *138*(6), 20161406. <https://doi.org/10.1542/peds.2016-1406>
- Padmanabhan, A., & Luna, B. (2014). Developmental imaging genetics : Linking dopamine function to adolescent behavior. *Brain and Cognition*, *89*, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.09.011>
- Palta, P., Schneider, A. L. C., Biessels, G. J., Touradji, P., & Hill-Briggs, F. (2014). Magnitude of cognitive dysfunction in adults with type 2 diabetes : A meta-analysis of six cognitive domains and the most frequently reported neuropsychological tests within domains. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, *20*(3), 278-291. <https://doi.org/10.1017/S1355617713001483>
- Panizzon, M. S., Fennema-Notestine, C., Eyler, L. T., Jernigan, T. L., Prom-Wormley, E., Neale, M., & Kremen, W. S. (2009). Distinct Genetic Influences on Cortical Surface Area and Cortical Thickness. *Cerebral Cortex*, *19*(11), 2728-2735. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp026>
- Pardo, J. V., Pardo, P. J., Janer, K. W., & Raichle, M. E. (1990). The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *87*(1), 256-259.
- Park, C., Kim, J., Namgung, E., Lee, D.-W., Kim, G. H., Kim, M., Kim, N., Kim, T. D., Kim, S., Lyoo, I. K., & Yoon, S. (2017). The BDNF Val66Met Polymorphism Affects the Vulnerability of the Brain Structural Network. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00400>
- Parr, A. C., Calabro, F., Larsen, B., Tervo-Clemmens, B., Elliot, S., Foran, W., Olafsson, V., & Luna, B. (2021). Dopamine-related striatal neurophysiology is associated with specialization of frontostriatal reward circuitry through adolescence. *Progress in Neurobiology*, *201*, 101997. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2021.101997>
- Paulsen, D. J., Hallquist, M. N., Geier, C. F., & Luna, B. (2015). Effects of incentives, age, and behavior on brain activation during inhibitory control : A longitudinal fMRI study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *11*, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.09.003>
- Paus, T. (2001). Primate anterior cingulate cortex : Where motor control, drive and cognition interface. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(6), 417-424.
- Paus, T., Keshavan, M., & Giedd, J. N. (2008). Why do many psychiatric disorders emerge during adolescence? *Nature Reviews Neuroscience*, *9*(12), 947-957. <https://doi.org/10.1038/nrn2513>
- Paus, T., Tomaiuolo, F., Otaky, N., Petrides, M., Atlas, J., Morris, R., & Evans, A. C. (1996). Human cingulate and paracingulate sulci : Pattern, variability, asymmetry, and probabilistic map. *Brain*, *6*, 207-214.
- Pearce, A. L., Leonhardt, C. A., & Vaidya, C. J. (2018). Executive and Reward-Related Function in Pediatric Obesity : A Meta-Analysis. *Childhood Obesity*, *14*(5), 265-279. <https://doi.org/10.1089/chi.2017.0351>

- Pears, K. C., Fisher, P. A., Bruce, J., Kim, H. K., & Yoerger, K. (2010). Early elementary school adjustment of maltreated children in foster care : The roles of inhibitory control and caregiver involvement. *Child Development, 81*(5), 1550-1564. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01491.x>
- Peer, E., Rothschild, D., Gordon, A., Evernden, Z., & Damer, E. (2022). Data quality of platforms and panels for online behavioral research. *Behavior Research Methods, 54*(4), 1643-1662. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01694-3>
- Pennequin, V., Nanty, I., & Khomsi, A. (2004). Mesurer la résistance à l'interférence chez l'enfant : Elaboration d'un nouveau test à effet Stroop. *L'Année Psychologique, 104*(2), 203-226.
- Pernet, C. R., Belov, N., Delorme, A., & Zammit, A. (2021). Mindfulness related changes in grey matter : A systematic review and meta-analysis. *Brain Imaging and Behavior, 15*(5), 2720-2730. <https://doi.org/10.1007/s11682-021-00453-4>
- Perret, P. (s. d.). *Contrôle inhibiteur et développement cognitif : Perspectives actuelles*. 39.
- Pessoa, L. (2008). On the relationship between emotion and cognition. *Nature Reviews Neuroscience, 9*(2), 148-158. <https://doi.org/10.1038/nrn2317>
- Peterburs, J., & Desmond, J. E. (2016). The role of the human cerebellum in performance monitoring. *Current opinion in neurobiology, 40*, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2016.06.011>
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain : 20 years after. *Annual Review of Neuroscience, 35*, 73-89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Phelps, E. A. (2004). Human emotion and memory : Interactions of the amygdala and hippocampal complex. *Current Opinion in Neurobiology, 14*(2), 198-202. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.015>
- Philip, L., Martin, J.-C., & Clavel, C. (2018). Rapid Facial Reactions in Response to Facial Expressions of Emotion Displayed by Real Versus Virtual Faces. *i-Perception, 9*(4), 2041669518786527. <https://doi.org/10.1177/2041669518786527>
- Philipp, S. T., Kalisch, T., Wachtler, T., & Dinse, H. R. (2015). Enhanced tactile acuity through mental states. *Scientific Reports, 5*(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/srep13549>
- Philippou, E., & Constantinou, M. (2014). The Influence of Glycemic Index on Cognitive Functioning : A Systematic Review of the Evidence. *Advances in Nutrition, 5*(2), 119-130. <https://doi.org/10.3945/an.113.004960>
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1948). *La représentation de l'espace chez l'enfant. [Representation of space by the child.]* (p. 581). Presses Universitaires de France.
- Picton, T. W., Stuss, D. T., Alexander, M. P., Shallice, T., Binns, M. A., & Gillingham, S. (2007). Effects of focal frontal lesions on response inhibition. *Cerebral Cortex, 17*(4), 826-838. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhk031>
- Plata, J. C. (2013). *Développement des fonctions exécutives et des théories de l'esprit chez l'enfant ayant une cardiopathie congénitale cyanogène opérée en période néonatale*. France.
- Polak, G. (2011). *Reexamining Jhāna : Towards a critical reconstruction of early Buddhist soteriology*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej.
- Polle, E., & Gair, J. (2021). Mindfulness-based stress reduction for medical students : A narrative review. *Canadian Medical Education Journal, 12*(2), e74-e80. <https://doi.org/10.36834/cmej.68406>
- Porter, L., Bailey-Jones, C., Priudokaite, G., Allen, S., Wood, K., Stiles, K., Parvin, O., Javid, M., Verbruggen, F., & Lawrence, N. S. (2018). From cookies to carrots; the effect of inhibitory control training on children's snack selections. *Appetite, 124*, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.05.010>
- Posner, M. I., & Driver, J. (1992). The neurobiology of selective attention. *Current Opinion in Neurobiology, 2*(2), 165-169. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(92\)90006-7](https://doi.org/10.1016/0959-4388(92)90006-7)
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2005). Influencing brain networks : Implications for education. *Trends in Cognitive Sciences, 9*(3), 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.007>



- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2007). Research on attention networks as a model for the integration of psychological science. *Annual Review of Psychology*, 58, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085516>
- Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Ghassemzadeh, H. (2019). Restoring Attention Networks. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, 92(1), 139-143.
- Posner, M. I., Rothbart, M. K., Sheese, B. E., & Tang, Y. (2007). The anterior cingulate gyrus and the mechanism of self-regulation. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 391-395. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.391>
- Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Tang, Y. (2013). Developing self-regulation in early childhood. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(3-4), 107-110. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.09.001>
- Poulhalec, M. (2017). *12 outils pour capter l'attention des enfants*. Éditions Jouvence.
- Pozuelos, J. P., Mead, B. R., Rueda, M. R., & Malinowski, P. (2019). Short-term mindful breath awareness training improves inhibitory control and response monitoring. *Progress in Brain Research*, 244, 137-163. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2018.10.019>
- Prencipe, A., Kesek, A., Cohen, J., Lamm, C., Lewis, M. D., & Zelazo, P. D. (2011). Development of hot and cool executive function during the transition to adolescence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 621-637. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.008>
- Purnell, J. Q., Klopfenstein, B. A., Stevens, A. A., Havel, P. J., Adams, S. H., Dunn, T. N., Krisky, C., & Rooney, W. D. (2011). Brain functional magnetic resonance imaging response to glucose and fructose infusions in humans. *Diabetes, Obesity & Metabolism*, 13(3), 229-234. <https://doi.org/10.1111/j.1463-1326.2010.01340.x>
- Querstret, D., Morison, L., Dickinson, S., Cropley, M., & John, M. (2020). Mindfulness-based stress reduction and mindfulness-based cognitive therapy for psychological health and well-being in nonclinical samples : A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Stress Management*, 27(4), 394-411. <https://doi.org/10.1037/str0000165>
- Rabiner, D. L., Murray, D. W., Skinner, A. T., & Malone, P. S. (2010). A randomized trial of two promising computer-based interventions for students with attention difficulties. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 38(1), 131-142. <https://doi.org/10.1007/s10802-009-9353-x>
- Radüntz, T. (2020). The Effect of Planning, Strategy Learning, and Working Memory Capacity on Mental Workload. *Scientific Reports*, 10(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63897-6>
- Raghubar, K. P., Barnes, M. A., & Hecht, S. A. (2010). Working memory and mathematics : A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.005>
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 676-682.
- Rakic, P. (1988). Specification of cerebral cortical areas. *Science*, 241(4862), 170-176.
- Ramanoël, S., Hoyau, E., Kauffmann, L., Renard, F., Pichat, C., Boudiaf, N., Krainik, A., Jaillard, A., & Baciù, M. (2018). Gray Matter Volume and Cognitive Performance During Normal Aging. A Voxel-Based Morphometry Study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnagi.2018.00235>
- Randler, C. (2007). Gender differences in morningness-eveningness assessed by self-report questionnaires : A meta-analysis. *Personality and Individual Differences*, 43(7), 1667-1675. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2007.05.004>
- Raoelison, M., Boissin, E., Borst, G., & De Neys, W. (2021). From slow to fast logic : The development of logical intuitions. *Thinking & Reasoning*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/13546783.2021.1885488>
- Raznahan, A., Greenstein, D., Lee, N. R., Clasen, L. S., & Giedd, J. N. (2012). Prenatal growth in humans and postnatal brain maturation into late adolescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(28), 11366-11371. <https://doi.org/10.1073/pnas.1203350109>

- Raznahan, A., Shaw, P., Lalonde, F., Stockman, M., Wallace, G. L., Greenstein, D., & Giedd, J. N. (2011). How Does Your Cortex Grow? *Journal of Neuroscience*, *31*(19), 7174-7177. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0054-11.2011>
- Rebelos, E., Rinne, J. O., Nuutila, P., & Ekblad, L. L. (2021). Brain Glucose Metabolism in Health, Obesity, and Cognitive Decline—Does Insulin Have Anything to Do with It? A Narrative Review. *Journal of Clinical Medicine*, *10*(7), 1532. <https://doi.org/10.3390/jcm10071532>
- Redgrave, P., Prescott, T., & Gurney, K. (1999). The basal ganglia : A vertebrate solution to the selection problem. *Neuroscience*, *89*, 1009-1023.
- Reh, R. K., Dias, B. G., Nelson, C. A., Kaufer, D., Werker, J. F., Kolb, B., Levine, J. D., & Hensch, T. K. (2020). Critical period regulation across multiple timescales. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *117*(38), 23242-23251. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820836117>
- Reuter, M., Frenzel, C., Walter, N. T., Markett, S., & Montag, C. (2011). Investigating the genetic basis of altruism : The role of the COMT Val158Met polymorphism. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *6*(5), 662-668. <https://doi.org/10.1093/scan/nsq083>
- Rey-Mermet, A., Gade, M., Souza, A. S., Bastian, C. C., & Oberauer, K. (2019). Is executive control related to working memory capacity and fluid intelligence? *Journal of Experimental Psychology: General*.
- Reynolds, L., & Flores, C. (2021). Mesocorticolimbic Dopamine Pathways Across Adolescence : Diversity in Development. *Frontiers in Neural Circuits*. <https://doi.org/10.3389/fncir.2021.735625>
- Reynolds, L. M., Pokinko, M., Torres-Berrío, A., Cuesta, S., Lambert, L. C., Del Cid Pellitero, E., Wodzinski, M., Manitt, C., Krimpenfort, P., Kolb, B., & Flores, C. (2018). DCC Receptors Drive Prefrontal Cortex Maturation by Determining Dopamine Axon Targeting in Adolescence. *Biological Psychiatry*, *83*(2), 181-192. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2017.06.009>
- Riccomagno, M. M., & Kolodkin, A. L. (2015). Sculpting neural circuits by axon and dendrite pruning. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, *31*, 779-805. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-100913-013038>
- Richardson, H., Lisandrelli, G., Riobueno-Naylor, A., & Saxe, R. (2018). Development of the social brain from age three to twelve years. *Nature Communications*, *9*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03399-2>
- Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., & Nieuwenhuis, S. (2004). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science (New York, N.Y)*, *306*(5695), 443-447. <https://doi.org/10.1126/science.1100301>
- Rigaud, J. (2005). *Vivre à propos*. Grasset.
- Robert, F., & Pelletier, J. (2018). Exploring the Impact of Single-Nucleotide Polymorphisms on Translation. *Frontiers in Genetics*, *9*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fgene.2018.00507>
- Roberts, R. D., & Kyllonen, P. C. (1999). Morningness—eveningness and intelligence : Early to bed, early to rise will likely make you anything but wise! Please note that the views expressed herein are those of the authors and are not part of official USAF policy. *Personality and Individual Differences*, *27*(6), 1123-1133. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(99\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(99)00054-9)
- Rock, P. L., Roiser, J. P., Riedel, W. J., & Blackwell, A. D. (2014). Cognitive impairment in depression : A systematic review and meta-analysis. *Psychological Medicine*, *44*(10), 2029-2040. <https://doi.org/10.1017/S0033291713002535>
- Roell, M., Viarouge, A., Hilscher, E., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for a visuospatial bias in decimal number comparison in adolescents and in adults. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-9.
- Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Inhibitory control and decimal number comparison in school-aged children. *PloS One*, *12*(11), 0188276.
- Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Inhibition of the whole number bias in decimal number comparison : A developmental negative priming study. *Journal of Experimental Child Psychology*, *177*, 240-247. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.08.010>

- Roeser, K., Brückner, D., Schwerdtle, B., Schlarb, A. A., & Kübler, A. (2012). Health-Related Quality of Life in Adolescent Chronotypes—A Model for the Effects of Sleep Problems, Sleep-Related Cognitions, and Self-efficacy. *Chronobiology International*, 29(10), 1358-1365. <https://doi.org/10.3109/07420528.2012.728664>
- Roeser, R. W., & Pinela, C. (2014). Mindfulness and compassion training in adolescence: A developmental contemplative science perspective. *New Directions for Youth Development*, 2014(142), 9-30. <https://doi.org/10.1002/yn.20094>
- Rogalsky, C., Matchin, W., & Hickok, G. (2008). Broca's area, sentence comprehension, and working memory: An fMRI study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/neuro.09.014.2008>
- Rogers, N. L., Dorrian, J., & Dinges, D. F. (2003). Sleep, waking and neurobehavioural performance. *Frontier Biosciences*, 8, 1056-1067.
- Rollins, C. P. E., Garrison, J. R., Arribas, M., Seyedsalehi, A., Li, Z., Chan, R. C. K., Yang, J., Wang, D., Liò, P., Yan, C., Yi, Z., Cachia, A., Upthegrove, R., Deakin, B., Simons, J. S., Murray, G. K., & Suckling, J. (2020). Evidence in cortical folding patterns for prenatal predispositions to hallucinations in schizophrenia. *Translational Psychiatry*, 10(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41398-020-01075-y>
- Ron-Grajales, A., Sanz-Martin, A., Castañeda-Torres, R. D., Esparza-López, M., Ramos-Loyo, J., & Inozemtseva, O. (2021). Effect of Mindfulness Training on Inhibitory Control in Young Offenders. *Mindfulness*, 12(7), 1822-1838. <https://doi.org/10.1007/s12671-021-01643-3>
- Roy, A. (2015). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Des considérations développementales et cliniques à la réalité scolaire. *Developpements*, 7, 13-40.
- Roy, A., Le Gall, D., Roulin, J.-L., & Fournet, N. (2012). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Approche épistémologique et sémiologie clinique. *Revue de Neuropsychologie*, 4(4), 287-297.
- Roy, S. K., Jahan, K., Alam, N., Rois, R., Ferdous, A., Israt, S., & Karim, Md. R. (2021). Perceived stress, eating behavior, and overweight and obesity among urban adolescents. *Journal of Health, Population, and Nutrition*, 40, 54. <https://doi.org/10.1186/s41043-021-00279-2>
- Royall, D. R., Lauterbach, E. C., Cummings, J. L., Reeve, A., Rummans, T. A., Kaufer, D. I., LaFrance, W. C., & Coffey, C. E. (2002). Executive control function: A review of its promise and challenges for clinical research. A report from the Committee on Research of the American Neuropsychiatric Association. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 14(4), 377-405. <https://doi.org/10.1176/jnp.14.4.377>
- Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S. C., Simmons, A., & Bullmore, E. T. (2000). Functional frontalisation with age: Mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 24(1), 13-19.
- Rubia, K., Russell, T., Overmeyer, S., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., Sharma, T., & Taylor, E. (2001). Mapping motor inhibition: Conjunctive brain activations across different versions of go/no-go and stop tasks. *NeuroImage*, 13(2), 250-261. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0685>
- Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., & Taylor, E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *NeuroImage*, 20(1), 351-358.
- Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., Toone, B., & Taylor, E. (2005). Abnormal brain activation during inhibition and error detection in medication-naïve adolescents with ADHD. *The American Journal of Psychiatry*, 162(6), 1067-1075. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.162.6.1067>
- 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.
- Rubia, K., Smith, A. B., Woolley, J., Nosarti, C., Heyman, I., Taylor, E., & Brammer, M. (2006). Progressive increase of frontostriatal brain activation from childhood to adulthood during event-related tasks of cognitive control. *Human Brain Mapping*, 27(12), 973-993. <https://doi.org/10.1002/hbm.20237>

- Rueda, M., Fan, J., Mccandliss, B., Halparin, J., Gruber, D., Lercari, L., & Posner, M. (2004). Development of attention networks in childhood. *Neuropsychologia*, *42*, 1029-1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Rueda, M. R., Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2004). Attentional control and self-regulation. In *Handbook of self-regulation : Research, theory, and applications* (Guilford Press (p. 284-299). K.D. Vohs & R.F. Baumeister.
- Rueda, M. R., Rothbart, M. K., McCandliss, B. D., Saccomanno, L., & Posner, M. I. (2005). Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*(41), 14931-14936.
- Ruiz-Gayo, M., & Olmo, N. D. (s. d.). Interaction Between Circadian Rhythms, Energy Metabolism, and Cognitive Function. *Current Pharmaceutical Design*, *26*(20), 2416-2425.
- Saarni, C. (1984). An Observational Study of Children's Attempts to Monitor Their Expressive Behavior. *Child Development*, *55*(4), 1504-1513. <https://doi.org/10.2307/1130020>
- Sahdra, B. K., MacLean, K. A., Ferrer, E., Shaver, P. R., Rosenberg, E. L., Jacobs, T. L., Zanesco, A. P., King, B. G., Aichele, S. R., Bridwell, D. A., Mangun, G. R., Lavy, S., Wallace, B. A., & Saron, C. D. (2011). Enhanced response inhibition during intensive meditation training predicts improvements in self-reported adaptive socioemotional functioning. *Emotion (Washington, D.C.)*, *11*(2), 299-312. <https://doi.org/10.1037/a0022764>
- Sahdra, B. K., Shaver, P. R., & Brown, K. W. (2010). A scale to measure nonattachment : A Buddhist complement to Western research on attachment and adaptive functioning. *Journal of Personality Assessment*, *92*(2), 116-127. <https://doi.org/10.1080/00223890903425960>
- Sajonz, B., Kahnt, T., Margulies, D. S., Park, S. Q., Wittmann, A., Stoy, M., Ströhle, A., Heinz, A., Northoff, G., & Bermpohl, F. (2010). Delineating self-referential processing from episodic memory retrieval: Common and dissociable networks. *NeuroImage*, *50*(4), 1606-1617. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.01.087>
- Sakowski, S. A., Cameron, F., & Feldman, E. L. (2020). Metabolism, cognition, and the brain throughout life. *Neurobiology of Disease*, *134*, 104698. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2019.104698>
- Salehinejad, M. A., Ghanavati, E., Rashid, Md. H. A., & Nitsche, M. (2021). Hot and cold executive functions in the brain : A prefrontal- cingular network. *Brain and Neuroscience Advances*, *5*, 1-19. <https://doi.org/10.1177/23982128211007769>
- Salvia, E., Tissier, C., Charron, S., Herent, P., Vidal, J., Lion, S., & Cachia, A. (2019). The local properties of bold signal fluctuations at rest monitor inhibitory control training in adolescents. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *38*, 100664. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100664>
- Sanger, K., & Dorjee, D. (2015). Mindfulness training for adolescents : A neurodevelopmental perspective on investigating modifications in attention and emotion regulation using event-related brain potentials. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, *15*. <https://doi.org/10.3758/s13415-015-0354-7>
- Schaeffner, S., Chevalier, N., Kubota, M., & Karbach, J. (2016). Metacognitive training. In D. T. Strobach & J. Karbach (Éds.), *Cognitive training : An overview of features an applications* (p. 255-266). Springer.
- Schlosser, M., Barnhofer, T., Requier, F., Deza-Araujo, Y. I., Abdoun, O., Marchant, N. L., Chételat, G., Collette, F., Klimecki, O. M., Lutz, A., André, C., Ashton, N., Allais, F., Asselineau, J., Arenaza-Urquijo, E., Bachelet, R., Baez, S., Batchelor, M., Beaugonin, A., ... Medit-Ageing Research Group. (2022). Measuring Psychological Mechanisms in Meditation Practice : Using a Phenomenologically Grounded Classification System to Develop Theory-Based Composite Scores. *Mindfulness*, *13*(3), 600-614. <https://doi.org/10.1007/s12671-021-01816-0>
- Schlotz, W., & Phillips, D. I. W. (2009). Fetal origins of mental health : Evidence and mechanisms. *Brain, Behavior, and Immunity*, *23*(7), 905-916. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2009.02.001>
- Schmeichel, B. J., & Tang, D. (2015). Individual Differences in Executive Functioning and Their Relationship to Emotional Processes and Responses. *Current Directions in Psychological Science*, *24*(2), 93-98. <https://doi.org/10.1177/0963721414555178>

- Schmidt, C., & Bao, Y. (2017). Chronobiological research for cognitive science : A multifaceted view. *PsyCh Journal*, 6(4), 249-252. <https://doi.org/10.1002/pchj.203>
- Schmidt, C., Collette, F. C., C., & Peigneux, P. (2007). A time to think : Circadian rhythms in human cognition. *Cognitive Neuropsychology*, 24(7), 755-789.
- Schmidt, S., & Walach, H. (2013). *Meditation – Neuroscientific Approaches and Philosophical Implications*. Springer Science & Business Media.
- Scholey, A. B., Harper, S., & Kennedy, D. O. (2001). Cognitive demand and blood glucose. *Physiology & Behavior*, 73(4), 585-592. [https://doi.org/10.1016/S0031-9384\(01\)00476-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9384(01)00476-0)
- Schonert-Reichl, K. A., Oberle, E., Lawlor, M. S., Abbott, D., Thomson, K., Oberlander, T. F., & Diamond, A. (2015). Enhancing cognitive and social-emotional development through a simple-to-administer mindfulness-based school program for elementary school children : A randomized controlled trial. *Developmental Psychology*, 51(1), 52-66. <https://doi.org/10.1037/a0038454>
- Schonert-Reichl, K., & Lawlor, M. (2010). The Effects of a Mindfulness-Based Education Program on Pre- and Early Adolescents' Well-Being and Social and Emotional Competence. *Mindfulness*, 1, 137-151. <https://doi.org/10.1007/s12671-010-0011-8>
- Schooler, J. W. (2002). Re-representing consciousness : Dissociations between experience and meta-consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(8), 339-344. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)01949-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)01949-6)
- Schuman-Olivier, Z., Trombka, M., Lovas, D. A., Brewer, J. A., Vago, D. R., Gawande, R., Dunne, J. P., Lazar, S. W., Loucks, E. B., & Fulwiler, C. (2020). Mindfulness and Behavior Change. *Harvard Review of Psychiatry*, 28(6), 371-394. <https://doi.org/10.1097/HRP.0000000000000277>
- Scioni, N., Cavallero, M., Zogmaister, C., & Marzocchi, G. M. (2020). Is Cognitive Training Effective for Improving Executive Functions in Preschoolers? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2019.02812>
- Semple, R. (2005). *Mindfulness-Based Cognitive Therapy for Children : A Randomized Group Psychotherapy Trial Developed to Enhance Attention and Reduce Anxiety*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28564.81282>
- Semple, R. J., Lee, J., Rosa, D., & Miller, L. F. (2010). A Randomized Trial of Mindfulness-Based Cognitive Therapy for Children : Promoting Mindful Attention to Enhance Social-Emotional Resiliency in Children. *Journal of Child and Family Studies*, 19(2), 218-229. <https://doi.org/10.1007/s10826-009-9301-y>
- Sepp, E., Kolk, H., Lõivukene, K., & Mikelsaar, M. (2014). Higher blood glucose level associated with body mass index and gut microbiota in elderly people. *Microbial Ecology in Health and Disease*, 25, 10.3402/mehd.v25.22857. <https://doi.org/10.3402/mehd.v25.22857>
- Shankland, R., Tessier, D., Strub, L., Gauchet, A., & Baeyens, C. (2021). Improving Mental Health and Well-Being through Informal Mindfulness Practices : An Intervention Study. *Applied Psychology: Health and Well-Being*, 13(1), 63-83. <https://doi.org/10.1111/aphw.12216>
- Shapiro, S. L., Brown, K. W., Thoresen, C., & Plante, T. G. (2011). The moderation of Mindfulness-based stress reduction effects by trait mindfulness : Results from a randomized controlled trial. *Journal of Clinical Psychology*, 67(3), 267-277. <https://doi.org/10.1002/jclp.20761>
- Shapiro, S. L., Carlson, L. E., Astin, J. A., & Freedman, B. (2006). Mechanisms of mindfulness. *Journal of Clinical Psychology*, 62(3), 373-386. <https://doi.org/10.1002/jclp.20237>
- Sharma, M., & Rush, S. E. (2014). Mindfulness-Based Stress Reduction as a Stress Management Intervention for Healthy Individuals : A Systematic Review. *Journal of Evidence-Based Complementary & Alternative Medicine*, 19(4), 271-286. <https://doi.org/10.1177/2156587214543143>
- Sharp, P. B., Sutton, B. P., Paul, E. J., Sherepa, N., Hillman, C. H., Cohen, N. J., Kramer, A. F., Prakash, R. S., Heller, W., Telzer, E. H., & Barbey, A. K. (2018). Mindfulness training induces structural connectome changes in insula networks. *Scientific Reports*, 8(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26268-w>

- Shaw, P., Greenstein, D., Lerch, J., Clasen, L., Lenroot, R., Gogtay, N., & Giedd, J. (2006). Intellectual ability and cortical development in children and adolescents. *Nature*, *440*(7084), 676-679. <https://doi.org/10.1038/nature04513>
- Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., & Wise, S. P. (2008). Neurodevelopmental Trajectories of the Human Cerebral Cortex. *Journal of Neuroscience*, *28*(14), 3586-3594. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5309-07.2008>
- Shaw, P., Lerch, J. P., Pruessner, J. C., Taylor, K. N., Rose, A. B., Greenstein, D., & Giedd, J. N. (2007). Cortical morphology in children and adolescents with different apolipoprotein E gene polymorphisms: An observational study. *The Lancet. Neurology*, *6*(6), 494-500. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(07\)70106-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(07)70106-0)
- 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>
- Shenhav, A., Cohen, J. D., & Botvinick, M. M. (2016). Dorsal anterior cingulate cortex and the value of control. *Nature Neuroscience*, *19*(10), 1286-1291. <https://doi.org/10.1038/nn.4384>
- Shields, G. S., Bonner, J. C., & Moons, W. G. (2015). Does cortisol influence core executive functions? A meta-analysis of acute cortisol administration effects on working memory, inhibition, and set-shifting. *Psychoneuroendocrinology*, *58*, 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2015.04.017>
- Shields, G. S., Sazma, M. A., & Yonelinas, A. P. (2016). The Effects of Acute Stress on Core Executive Functions: A Meta-Analysis and Comparison with Cortisol. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, *68*, 651-668. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.06.038>
- Shulman, E. P., Smith, A. R., Silva, K., Icenogle, G., Duell, N., Chein, J., & Steinberg, L. (2016). The dual systems model: Review, reappraisal, and reaffirmation. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *17*, 103-117. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.12.010>
- Siegel, L. (1994). Working memory and reading: A lifespan perspective. *Int J Behav Dev*, *17*, 109-124.
- Siegling, A. B., & Petrides, K. V. (2014). Measures of trait mindfulness: Convergent validity, shared dimensionality, and linkages to the five-factor model. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1164. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01164>
- Silverman, I. W. (2021). Gender differences in inhibitory control as assessed on simple delay tasks in early childhood: A meta-analysis. *International Journal of Behavioral Development*, *45*(6), 533-544. <https://doi.org/10.1177/01650254211020385>
- Simmonds, D. J., Pekar, J. J., & Mostofsky, S. H. (2008). Meta-analysis of Go/No-go tasks demonstrating that fMRI activation associated with response inhibition is task-dependent. *Neuropsychologia*, *46*(1), 224-232. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.015>
- Simon, J. R., & Small, A. M. (1969). Processing auditory information: Interference from an irrelevant cue. *The Journal of Applied Psychology*, *53*(5), 433-435. <https://doi.org/10.1037/h0028034>
- Siqueira, S., Franco, C., Mañas, I., Cangas, A., & Gallego, J. (2013). *Exploring the Effects of a Mindfulness Program for Students of Secondary School* (p. 153-167). <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-4157-0.ch013>
- Sleilaty, J. (2022). The Impact of a Regular Mindfulness Practice on Teachers: A Critical Review. *Emerging Perspectives: Interdisciplinary Graduate Research in Education and Psychology*, *6*(1), Art. 1.
- Smith, A. R., Chein, J., & Steinberg, L. (2013). Impact of socio-emotional context, brain development, and pubertal maturation on adolescent risk-taking. *Hormones and Behavior*, *64*(2), 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2013.03.006>
- Smith, J. C. (1975). Meditation as psychotherapy: A review of the literature. *Psychological Bulletin*, *82*(4), 558-564. <https://doi.org/10.1037/h0076888>
- Smith, J. L., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2006). Effects of pre-stimulus processing on subsequent events in a warned Go/NoGo paradigm: Response preparation, execution and inhibition. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, *61*(2), 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.07.013>

- Smith, J. L., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2008). Movement-related potentials in the Go/NoGo task : The P3 reflects both cognitive and motor inhibition. *Clinical Neurophysiology*, *119*(3), 704-714. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.11.042>
- Smittenaar, P., Guitart-Masip, M., Lutti, A., & Dolan, R. J. (2013). Preparing for selective inhibition within frontostriatal loops. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *33*(46), 18087-18097. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2167-13.2013>
- Smittenaar, P., Rutledge, R. B., Zeidman, P., Adams, R. A., Brown, H., Lewis, G., & Dolan, R. J. (2015). Proactive and Reactive Response Inhibition across the Lifespan. *PLOS ONE*, *10*(10), e0140383. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140383>
- Smolker, H. R., Wang, K., Luciana, M., Bjork, J. M., Gonzalez, R., Barch, D. M., McClade, E. C., Kaiser, R. H., Friedman, N. P., Hewitt, J. K., & Banich, M. T. (2022). The Emotional Word-Emotional Face Stroop task in the ABCD study : Psychometric validation and associations with measures of cognition and psychopathology. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *53*, 101054. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.101054>
- Snel, E. (2017). *Calme et attentif comme une grenouille. Les Arènes*.
- Snyder, H. R., Kaiser, R. H., Warren, S. L., & Heller, W. (2015). Obsessive-compulsive disorder is associated with broad impairments in executive function : A meta-analysis. *Clinical Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, *3*(2), 301-330. <https://doi.org/10.1177/2167702614534210>
- Snyder, H. R., Miyake, A., & Hankin, B. L. (2015). Advancing understanding of executive function impairments and psychopathology : Bridging the gap between clinical and cognitive approaches. *Frontiers in Psychology*, *6*, 328. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00328>
- Söderqvist, S., Bergman Nutley, S., Peyrard-Janvid, M., Matsson, H., Humphreys, K., Kere, J., & Klingberg, T. (2012). Dopamine, working memory, and training induced plasticity : Implications for developmental research. *Developmental Psychology*, *48*(3), 836-843. <https://doi.org/10.1037/a0026179>
- Sokoloff, L., Reivich, M., Kennedy, C., Des Rosiers, M. H., Patlak, C. S., Pettigrew, K. D., Sakurada, O., & Shinohara, M. (1977). The [<sup>14</sup>C]deoxyglucose method for the measurement of local cerebral glucose utilization : Theory, procedure, and normal values in the conscious and anesthetized albino rat. *Journal of Neurochemistry*, *28*(5), 897-916. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.1977.tb10649.x>
- Solhaug, I., de Vibe, M., Friborg, O., Sørli, T., Tyssen, R., Bjørndal, A., & Rosenvinge, J. H. (2019). Long-term mental health effects of mindfulness training : A 4-year follow-up study. *Mindfulness*, *10*(8), 1661-1672.
- Solomon, T., Plamondon, A., O'Hara, A., Finch, H., Goco, G., Chaban, P., & Tannock, R. (2017). A Cluster Randomized-Controlled Trial of the Impact of the Tools of the Mind Curriculum on Self-Regulation in Canadian Preschoolers. *Frontiers in Psychology*, *8*, 2366. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02366>
- Song, J., Feng, P., Zhao, X., Xu, W., Xiao, L., Zhou, J., & Zheng, Y. (2017). Chronotype regulates the neural basis of response inhibition during the daytime. *Chronobiology International*, *35*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/07420528.2017.1392550>
- Sowell, E. R. (2004). Longitudinal Mapping of Cortical Thickness and Brain Growth in Normal Children. *Journal of Neuroscience*, *24*(38), 8223-8231. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1798-04.2004>
- Speranza, M., & Valeri, G. (2010). Trajectoires développementales en psychopathologie : Apprentissages et construction de soi chez l'enfant et l'adolescent. *Developpements*, *n° 6*(3), 5-15.
- Spielberg, J. M., Miller, G. A., Heller, W., & Banich, M. T. (2015). Flexible brain network reconfiguration supporting inhibitory control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(32), 10020-10025. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500048112>

- Spierer, L., Chavan, C. F., & Manuel, A. L. (2013). Training-induced behavioral and brain plasticity in inhibitory control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00427>
- Spijkerman, M. P. J., Pots, W. T. M., & Bohlmeijer, E. T. (2016). Effectiveness of online mindfulness-based interventions in improving mental health : A review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Clinical Psychology Review*, 45, 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2016.03.009>
- Spunt, R. P., Lieberman, M. D., Cohen, J. R., & Eisenberger, N. I. (2012). The Phenomenology of error processing : The dorsal ACC response to stop-signal error tracks reports of negative affect. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24, 1753-1765.
- Sridharan, D., Levitin, D., & Menon, V. (2008). A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 12569-12574. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800005105>
- St. John, T., Dawson, G., & Estes, A. (2018). Brief Report : Executive Function as a Predictor of Academic Achievement in School-Aged Children with ASD. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 48(1), 276-283. <https://doi.org/10.1007/s10803-017-3296-9>
- Staiano, A. E., Abraham, A. A., & Calvert, S. L. (2012). Competitive Versus Cooperative Exergame Play for African American Adolescents' Executive Function Skills : Short-Term Effects in a Long-Term Training Intervention. *Developmental psychology*, 48(2), 337-342. <https://doi.org/10.1037/a0026938>
- Steinberg, L. (2008). A Social Neuroscience Perspective on Adolescent Risk-Taking. *Developmental review : DR*, 28(1), 78-106. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.08.002>
- Steinberg, L. (2010). A dual systems model of adolescent risk-taking. *Developmental Psychobiology*, 52(3), 216-224. <https://doi.org/10.1002/dev.20445>
- Steiner, N. J., Frenette, E. C., Rene, K. M., Brennan, R. T., & Perrin, E. C. (2014). In-school neurofeedback training for ADHD: sustained improvements from a randomized control trial. *Pediatrics*, 133(3), 483-492. <https://doi.org/10.1542/peds.2013-2059>
- Stevens, J. R., Prince, J. B., Prager, L. M., & Stern, T. A. (2014). Psychotic Disorders in Children and Adolescents : A Primer on Contemporary Evaluation and Management. *The Primary Care Companion for CNS Disorders*, 16(2), PCC.13f01514. <https://doi.org/10.4088/PCC.13f01514>
- Stiles, J. (2008). *The fundamentals of brain development : Integrating nature and nurture*. Harvard University Press.
- Stock, A.-K., Arning, L., Epplen, J. T., & Beste, C. (2014). DRD1 and DRD2 Genotypes Modulate Processing Modes of Goal Activation Processes during Action Cascading. *The Journal of Neuroscience*, 34(15), 5335-5341. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5140-13.2014>
- Stollstorff, M., Foss-Feig, J., Cook, E. H., Stein, M. A., Gaillard, W. D., & Vaidya, C. J. (2010). Neural response to working memory load varies by dopamine transporter genotype in children. *NeuroImage*, 53(3), 970-977. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.104>
- Storebø, O. J., Ramstad, E., Krogh, H. B., Nilausen, T. D., Skoog, M., Holmskov, M., Rosendal, S., Groth, C., Magnusson, F. L., & Moreira-Maia, C. R. (2015). Methylphenidate for children and adolescents with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 11.
- Storsve, A. B., Fjell, A. M., Tamnes, C. K., Westlye, L. T., Overbye, K., Aasland, H. W., & Walhovd, K. B. (2014). Differential Longitudinal Changes in Cortical Thickness, Surface Area and Volume across the Adult Life Span : Regions of Accelerating and Decelerating Change. *The Journal of Neuroscience*, 34(25), 8488-8498. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0391-14.2014>
- Stranahan, A. M., & Mattson, M. P. (2012). Metabolic reserve as a determinant of cognitive aging. *Journal of Alzheimer's disease : JAD*, 30(0 2), S5-13. <https://doi.org/10.3233/JAD-2011-110899>
- 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>



- Substance Abuse and Mental Health Services Administration. (2016). *DSM-5 Changes : Implications for Child Serious Emotional Disturbance*. Substance Abuse and Mental Health Services Administration (US). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK519708/>
- Suda, A., Osada, T., Ogawa, A., Tanaka, M., Kamagata, K., Aoki, S., Hattori, N., & Konishi, S. (2020). Functional Organization for Response Inhibition in the Right Inferior Frontal Cortex of Individual Human Brains. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *30*(12), 6325-6335. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa188>
- Sun, Z. Y., Klöppel, S., Rivièrè, D., Perrot, M., Frackowiak, R., Siebner, H., & Mangin, J.-F. (2012). The effect of handedness on the shape of the central sulcus. *NeuroImage*, *60*(1), 332-339. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.12.050>
- Sung, D., Park, B., Kim, B., Kim, H., Jung, K.-I., Lee, S.-Y., Kim, B.-N., Park, S., & Park, M.-H. (2021). Gray Matter Volume in the Developing Frontal Lobe and Its Relationship With Executive Function in Late Childhood and Adolescence : A Community-Based Study. *Frontiers in Psychiatry*, *12*, 686174. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2021.686174>
- Suzuki, W. A. (1996). The anatomy, physiology and functions of the perirhinal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *6*(2), 179-186. [https://doi.org/10.1016/s0959-4388\(96\)80071-7](https://doi.org/10.1016/s0959-4388(96)80071-7)
- Swick, D., Ashley, V., & Turken, A. U. (2008). Left inferior frontal gyrus is critical for response inhibition. *BMC Neuroscience*, *9*, 102. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-102>
- Swick, D., Ashley, V., & Turken, U. (2011). Are the neural correlates of stopping and not going identical ? Quantitative meta-analysis of two response inhibition tasks. *NeuroImage*, *56*(3), 1655-1665. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.02.070>
- Swick, D., & Chatham, C. H. (2014). Ten years of inhibition revisited. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.00329>
- Swick, D., & Jovanovic, J. (2002). Anterior cingulate cortex and the Stroop task : Neuropsychological evidence for topographic specificity. *Neuropsychologia*, *40*(8), 1240-1253. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00226-3](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00226-3)
- 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>
- Takeuchi, H., Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Nagase, T., & Kawashima, R. (2012). Regional gray and white matter volume associated with Stroop interference : Evidence from voxel-based morphometry. *NeuroImage*, *59*(3), 2899-2907. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.064>
- Takeuchi, H., Taki, Y., Sassa, Y., Sekiguchi, A., Nagase, T., Nouchi, R., & Kawashima, R. (2015). The Associations between Regional Gray Matter Structural Changes and Changes of Cognitive Performance in Control Groups of Intervention Studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00681>
- Talanow, T., & Ettinger, U. (2018). Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control training in healthy adults. *Acta Psychologica*, *187*, 37-53. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.04.016>
- Talkowski, M. E., Kirov, G., Bamne, M., Georgieva, L., Torres, G., Mansour, H., Chowdari, K. V., Milanova, V., Wood, J., McClain, L., Prasad, K., Shirts, B., Zhang, J., O'Donovan, M. C., Owen, M. J., Devlin, B., & Nimgaonkar, V. L. (2008). A network of dopaminergic gene variations implicated as risk factors for schizophrenia. *Human Molecular Genetics*, *17*(5), 747-758. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddm347>
- Tamnes, C. K., & Østby, Y. (2018). Morphometry and Development : Changes in Brain Structure from Birth to Adult Age. In G. Spalletta, F. Piras, & T. Gili (Éds.), *Brain Morphometry* (Vol. 136, p. 143-164). [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-7647-8\\_10](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-7647-8_10)
- Tan, L. (2015). A critical review of adolescent mindfulness-based programmes. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *21*. <https://doi.org/10.1177/1359104515577486>
- Tan, L., & Martin, G. (2015). Taming the adolescent mind : A randomised controlled trial examining clinical efficacy of an adolescent mindfulness-based group programme. *Child and Adolescent Mental Health*, *20*(1), 49-55. <https://doi.org/10.1111/camh.12057>

- Tang, D., & Schmeichel, B. J. (2014). Stopping anger and anxiety : Evidence that inhibitory ability predicts negative emotional responding. *Cognition & Emotion*, 28(1), 132-142. <https://doi.org/10.1080/02699931.2013.799459>
- Tang, R., Friston, K. J., & Tang, Y.-Y. (2020). Brief Mindfulness Meditation Induces Gray Matter Changes in a Brain Hub. *Neural Plasticity*, 2020, 8830005. <https://doi.org/10.1155/2020/8830005>
- Tang, Y.-Y. (2011). Mechanism of Integrative Body-Mind Training. *Neuroscience Bulletin*, 27(6), 383-388. <https://doi.org/10.1007/s12264-011-1141-2>
- Tang, Y.-Y. (2017a). *The Neuroscience of Mindfulness Meditation : How the Body and Mind Work Together to Change Our Behaviour*. Springer.
- Tang, Y.-Y. (2017b). *Traits and States in Mindfulness Meditation* (p. 29-34). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46322-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46322-3_4)
- Tang, Y.-Y., Askari, P., & Choi, C. (2020). Brief mindfulness training increased glutamate metabolism in the anterior cingulate cortex. *Neuroreport*, 31(16), 1142-1145. <https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000001527>
- Tang, Y.-Y., Hölzel, B. K., & Posner, M. I. (2015). The neuroscience of mindfulness meditation. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 213-225. <https://doi.org/10.1038/nrn3916>
- Tang, Y.-Y., Jiang, C., & Tang, R. (2017). How Mind-Body Practice Works—Integration or Separation? *Frontiers in Psychology*, 8. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2017.00866>
- Tang, Y.-Y., Lu, Q., Fan, M., Yang, Y., & Posner, M. I. (2012). Mechanisms of white matter changes induced by meditation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(26), 10570-10574. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207817109>
- Tang, Y.-Y., Lu, Q., Geng, X., Stein, E. A., Yang, Y., & Posner, M. I. (2010). Short-term meditation induces white matter changes in the anterior cingulate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(35), 15649-15652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011043107>
- Tang, Y.-Y., Ma, Y., Fan, Y., Feng, H., Wang, J., Feng, S., Lu, Q., Hu, B., Lin, Y., Li, J., Zhang, Y., Wang, Y., Zhou, L., & Fan, M. (2009). Central and autonomic nervous system interaction is altered by short-term meditation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(22), 8865-8870. <https://doi.org/10.1073/pnas.0904031106>
- Tang, Y.-Y., Ma, Y., Wang, J., Fan, Y., Feng, S., Lu, Q., Yu, Q., Sui, D., Rothbart, M. K., Fan, M., & Posner, M. I. (2007). Short-term meditation training improves attention and self-regulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(43), 17152-17156. <https://doi.org/10.1073/pnas.0707678104>
- Tang, Y.-Y., & Posner, M. I. (2009). Attention training and attention state training. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(5), 222-227. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.01.009>
- Tang, Y.-Y., & Posner, M. I. (2013). Tools of the trade : Theory and method in mindfulness neuroscience. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8(1), 118-120. <https://doi.org/10.1093/scan/nss112>
- Tang, Y.-Y., Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2012). Neural correlates of establishing, maintaining, and switching brain states. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(6), 330-337. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.05.001>
- Tang, Y.-Y., Tang, R., & Gross, J. (2019). Promoting Psychological Well-Being Through an Evidence-Based Mindfulness Training Program. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 237. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00237>
- Tang, Y.-Y., Tang, R., & Posner, M. I. (2013). Brief meditation training induces smoking reduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(34), 13971-13975. <https://doi.org/10.1073/pnas.1311887110>
- Tang, Y.-Y., Tang, R., Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2019). Frontal theta activity and white matter plasticity following mindfulness meditation. *Current Opinion in Psychology*, 28, 294-297. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.04.004>
- Tannock, R. (s. d.). Development of inhibitory control across the life span. *Developmental Psychology*.

[https://www.academia.edu/5290455/Development\\_of\\_inhibitory\\_control\\_across\\_the\\_life\\_span](https://www.academia.edu/5290455/Development_of_inhibitory_control_across_the_life_span)

- Taren, A. A., Gianaros, P. J., Greco, C. M., Lindsay, E. K., Fairgrieve, A., Brown, K. W., Rosen, R. K., Ferris, J. L., Julson, E., Marsland, A. L., & Creswell, J. D. (2017). Mindfulness Meditation Training and Executive Control Network Resting State Functional Connectivity : A Randomized Controlled Trial. *Psychosomatic medicine*, 79(6), 674-683. <https://doi.org/10.1097/PSY.0000000000000466>
- Tatu, L. (2011). Anatomie du cortex cérébral : Lobe frontal. *La Lettre du Neurologue*, 10(15), 372-373.
- Tau, G. Z., & Peterson, B. S. (2010). Normal development of brain circuits. *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 35(1), 147-168. <https://doi.org/10.1038/npp.2009.115>
- Teasdale, J. D., Segal, Z., & Williams, J. M. G. (1995). How does cognitive therapy prevent depressive relapse and why should attentional control (mindfulness) training help? *Behaviour Research and Therapy*, 33(1), 25-39. [https://doi.org/10.1016/0005-7967\(94\)E0011-7](https://doi.org/10.1016/0005-7967(94)E0011-7)
- Teper, R., & Inzlicht, M. (2013). Meditation, mindfulness and executive control : The importance of emotional acceptance and brain-based performance monitoring. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8(1), 85-92. <https://doi.org/10.1093/scan/nss045>
- Teuber, H. L. (1972). Unity and diversity of frontal lobe functions. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 32(2), 615-656.
- Thamotharan, S., Lange, K., Zale, E. L., Huffhines, L., & Fields, S. (2013). The role of impulsivity in pediatric obesity and weight status : A meta-analytic review. *Clinical Psychology Review*, 33(2), 253-262. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2012.12.001>
- Tharaldsen, K. (2012). Mindful coping for adolescents : Beneficial or confusing. *Advances in School Mental Health Promotion*, 5(2), 105-124. <https://doi.org/10.1080/1754730X.2012.691814>
- Thibault, D., Kortleven, C., Fasano, C., Dal Bo, G., & Trudeau, L.-É. (2010). Découvertes récentes sur la fonction et la plasticité des voies dopaminergiques du cerveau. *médecine/sciences*, 26(2), 165-170. <https://doi.org/10.1051/medsci/2010262165>
- Thoenen, H. (1995). Neurotrophins and Neuronal Plasticity. *Science*, 270(5236), 593-598. <https://doi.org/10.1126/science.270.5236.593>
- Thomas, M. S. C., Baughman, F. D., & Lehalle, H. (2014). Neuroconstructivisme : Comprendre les trajectoires développementales typiques et atypiques. *Enfance*, 3(3), 205-236.
- Thompson, G. J. (2018). Neural and metabolic basis of dynamic resting state fMRI. *NeuroImage*, 180, 448-462. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.09.010>
- Thompson, P. M., Cannon, T. D., Narr, K. L., Erp, T., Poutanen, V. P., Huttunen, M., & Toga, A. W. (2001). Genetic influences on brain structure. *Nature Neuroscience*, 4(12), 1253-1258. <https://doi.org/10.1038/nn758>
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science*, 12(1), 106-113. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x>
- Tiego, J., Testa, R., Bellgrove, M. A., Pantelis, C., & Whittle, S. (2018). A Hierarchical Model of Inhibitory Control. *Frontiers in Psychology*, 9, 1339. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01339>
- Tipper, S. P. (1985). The negative priming effect : Inhibitory priming by ignored objects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 37(4), 571-590. [10 1080 14640748508400920](https://doi.org/10.1080/14640748508400920).
- Tisserand, D. J., van Boxtel, M. P. J., Pruessner, J. C., Hofman, P., Evans, A. C., & Jolles, J. (2004). A voxel-based morphometric study to determine individual differences in gray matter density associated with age and cognitive change over time. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 14(9), 966-973. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh057>
- Tissier, C., Linzarini, A., Allaire-Duquette, G., Mevel, K., Poirel, N., Dollfus, S., Etard, O., Orliac, F., Peyrin, C., Charron, S., Raznahan, A., Houdé, O., Borst, G., & Cachia, A. (2018). Sulcal Polymorphisms of the IFC and ACC Contribute to Inhibitory Control Variability in Children and Adults. *ENEURO*, 5(1), ENEURO.0197-17.2018. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0197-17.2018>

- Tooley, U. A., Bassett, D. S., & Mackey, A. P. (2021). Environmental influences on the pace of brain development. *Nature Reviews Neuroscience*, 22(6), Art. 6. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00457-5>
- Tottenham, N., Tanaka, J. W., Leon, A. C., McCarry, T., Nurse, M., Hare, T. A. N., & C. (2009). The NimStim set of facial expressions : Judgments from untrained research participants. *Psychiatry Research*, 168, 242-249.
- Traut, H. J., Guild, R. M., & Munakata, Y. (2021). Why Does Cognitive Training Yield Inconsistent Benefits? A Meta-Analysis of Individual Differences in Baseline Cognitive Abilities and Training Outcomes. *Frontiers in Psychology*, 12, 662139. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.662139>
- 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, 525. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00525>
- Trousselard, M., Steiler, D., Raphel, C., Cian, C., Duymedjian, R., Claverie, D., & Canini, F. (2010). Validation of a French version of the Freiburg Mindfulness Inventory - short version : Relationships between mindfulness and stress in an adult population. *Biopsychosocial Medicine*, 4, 8. <https://doi.org/10.1186/1751-0759-4-8>
- Tsai, S.-J. (2018). Critical Issues in BDNF Val66Met Genetic Studies of Neuropsychiatric Disorders. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 11. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnmol.2018.00156>
- Tsang, J., Fullard, J. F., Giakoumaki, S. G., Katsel, P., Katsel, P., Karagiorga, V. E., Greenwood, T. A., Braff, D. L., Siever, L. J., Bitsios, P., Haroutunian, V., & Roussos, P. (2015). The relationship between dopamine receptor D1 and cognitive performance. *NPJ Schizophrenia*, 1, 14002. <https://doi.org/10.1038/npjrsch.2014.2>
- Tsermentseli, S., & Poland, S. (2016). *Cool versus hot executive function : A new approach to executive function*. 4.
- Tubío Fungueiriño, M., Fernández Prieto, M., Carvalho, S., Leite, J., Carracedo, Á., & Gonçalves, Ó. F. (2020). Executive impairments in Obsessive Compulsive Disorder : A systematic review with emotional and non-emotional paradigms. *Psicothema*, 32(1), 24-32. <https://doi.org/10.7334/psicothema2019.187>
- Tunbridge, E. M., Narajos, M., Harrison, C. H., Beresford, C., Cipriani, A., & Harrison, P. J. (2019). Which Dopamine Polymorphisms Are Functional? Systematic Review and Meta-analysis of COMT, DAT, DBH, DDC, DRD1–5, MAOA, MAOB, TH, VMAT1, and VMAT2. *Biological Psychiatry*, 86(8), 608-620. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2019.05.014>
- Tymofiyeva, O., & Gaschler, R. (2021). Training-Induced Neural Plasticity in Youth : A Systematic Review of Structural and Functional MRI Studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2020.497245>
- Vago, D., & David, S. (2012). Self-awareness, self-regulation, and self-transcendence (S-ART) : A framework for understanding the neurobiological mechanisms of mindfulness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2012.00296>
- Van Dam, N. T., & Galante, J. (2020). Underestimating harm in mindfulness-based stress reduction. *Psychological Medicine*, 1-3. <https://doi.org/10.1017/S003329172000447X>
- Van Dam, N. T., van Vugt, M. K., Vago, D. R., Schmalzl, L., Saron, C. D., Olenzki, A., Meissner, T., Lazar, S. W., Gorchov, J., Fox, K. C. R., Field, B. A., Britton, W. B., Brefczynski-Lewis, J. A., & Meyer, D. E. (2018). Reiterated Concerns and Further Challenges for Mindfulness and Meditation Research : A Reply to Davidson and Dahl. *Perspectives on psychological science : a journal of the Association for Psychological Science*, 13(1), 66-69. <https://doi.org/10.1177/1745691617727529>
- van den Hurk, P. A. M., Giommi, F., Gielen, S. C., Speckens, A. E. M., & Barendregt, H. P. (2010). Greater efficiency in attentional processing related to mindfulness meditation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (2006), 63(6), 1168-1180. <https://doi.org/10.1080/17470210903249365>

- van der Zwan, J. E., de Vente, W., Huizink, A. C., Bögels, S. M., & de Bruin, E. I. (2015). Physical Activity, Mindfulness Meditation, or Heart Rate Variability Biofeedback for Stress Reduction : A Randomized Controlled Trial. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, *40*(4), 257-268. <https://doi.org/10.1007/s10484-015-9293-x>
- van de Weijer-Bergsma, E., Langenberg, G., Brandsma, R., Oort, F. J., & Bögels, S. M. (2014). The effectiveness of a school-based mindfulness training as a program to prevent stress in elementary school children. *Mindfulness*, *5*(3), 238-248.
- Vanderwal, T., Eilbott, J., & Castellanos, F. X. (2018). *Movies in the magnet : Naturalistic paradigms in developmental functional neuroimaging*. *Developmental Cognitive Neuroscience*. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.10.004>
- van Duijvenvoorde, A. C. K., Westhoff, B., de Vos, F., Wierenga, L. M., & Crone, E. A. (2019). A three-wave longitudinal study of subcortical–cortical resting-state connectivity in adolescence : Testing age- and puberty-related changes. *Human Brain Mapping*, *40*(13), 3769-3783. <https://doi.org/10.1002/hbm.24630>
- Varela, F. J., Rosch, E., & Thompson, E. (1991). *The Embodied Mind : Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press.
- Vásquez-Rosati, A., Montefusco-Siegmund, R., López, V., & Cosmelli, D. (2019). Emotional Influences on Cognitive Flexibility Depend on Individual Differences : A Combined Micro-Phenomenological and Psychophysiological Study. *Frontiers in Psychology*, *0*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01138>
- Vekety, B., Logemann, A., & Takacs, Z. K. (2022). Mindfulness Practice with a Brain-Sensing Device Improved Cognitive Functioning of Elementary School Children : An Exploratory Pilot Study. *Brain Sciences*, *12*(1), 103. <https://doi.org/10.3390/brainsci12010103>
- Venkat, N., Sinha, M., Sinha, R., Ghate, J., & Pande, B. (2020). Neuro-Cognitive Profile of Morning and Evening Chronotypes at Different Times of Day. *Annals of Neurosciences*, *27*(3-4), 257-265. <https://doi.org/10.1177/0972753121990280>
- Verbruggen, F., Adams, R., & Chambers, C. D. (2012). Proactive motor control reduces monetary risk taking in gambling. *Psychological Science*, *23*(7), 805-815. <https://doi.org/10.1177/0956797611434538>
- Verbruggen, F., Aron, A. R., Band, G. P., Beste, C., Bissett, P. G., Brockett, A. T., Brown, J. W., Chamberlain, S. R., Chambers, C. D., Colonius, H., Colzato, L. S., Corneil, B. D., Coxon, J. P., Dupuis, A., Eagle, D. M., Garavan, H., Greenhouse, I., Heathcote, A., Huster, R. J., & Boehler, C. N. (2019). A consensus guide to capturing the ability to inhibit actions and impulsive behaviors in the stop-signal task. *eLife*, *8*, 46323. <https://doi.org/10.7554/eLife.46323>
- Verbruggen, F., Schneider, D. W., & Logan, G. D. (2008). How to stop and change a response : The role of goal activation in multitasking. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *34*(5), 1212-1228. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.34.5.1212>
- Verhaeghen, P. (2021). Mindfulness as Attention Training : Meta-Analyses on the Links Between Attention Performance and Mindfulness Interventions, Long-Term Meditation Practice, and Trait Mindfulness. *Mindfulness*, *12*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12671-020-01532-1>
- Verlaan, P., Cantin, S., & Boivin, M. (2001). L'Échelle de développement pubertaire : Équivalence en langue française du>. [The scale of pubertal development: Validation of the french language version of the « Pubertal Developmental Scale. »]. *Canadian Journal of Behavioural Science / Revue canadienne des sciences du comportement*, *33*(3), 143-147. <https://doi.org/10.1037/h0087136>
- Veroude, K., Jolles, J., Croiset, G., & Krabbendam, L. (2013). Changes in neural mechanisms of cognitive control during the transition from late adolescence to young adulthood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *5*, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.12.002>
- Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for the role of inhibition in numerical comparison : A negative priming study in 7-to 8-year-olds and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, *186*, 131-141.

- Vijayakumar, N., Mills, K. L., Alexander-Bloch, A., Tamnes, C. K., & Whittle, S. (2018). Structural brain development : A review of methodological approaches and best practices. *Developmental Cognitive Neuroscience, 33*, 129-148. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.11.008>
- Viviani, G., & Vallesi, A. (2021). EEG-neurofeedback and executive function enhancement in healthy adults : A systematic review. *Psychophysiology, 58*(9), e13874. <https://doi.org/10.1111/psyp.13874>
- Vogt, B. A., Finch, D. M., & Olson, C. R. (1992). Functional Heterogeneity in Cingulate Cortex : The Anterior Executive and Posterior Evaluative Regions. *Cerebral Cortex, 2*(6), 435-443. <https://doi.org/10.1093/cercor/2.6.435-a>
- Vohs, K. D., & Baumeister, R. F. (2011). *Handbook of Self-Regulation, Second Edition : Research, Theory, and Applications*. Guilford Press.
- Volkow, N. D., Wise, R. A., & Baler, R. (2017). The dopamine motive system : Implications for drug and food addiction. *Nature Reviews Neuroscience, 18*(12), 741-752. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.130>
- Vosberg, D. E., Leyton, M., & Flores, C. (2020). The Netrin-1/DCC guidance system : Dopamine pathway maturation and psychiatric disorders emerging in adolescence. *Molecular Psychiatry, 25*(2), 297-307. <https://doi.org/10.1038/s41380-019-0561-7>
- Wade, M., Prime, H., Jenkins, J. M., Yeates, K. O., Williams, T., & Lee, K. (2018). On the relation between theory of mind and executive functioning : A developmental cognitive neuroscience perspective. *Psychonomic Bulletin & Review, 25*, 2119-2140.
- Wadlinger, H. A., & Isaacowitz, D. M. (2011). Fixing our focus : Training attention to regulate emotion. *Personality and social psychology review, 15*(1), 75-102.
- Walach, H., Buchheld, N., Buttenmüller, V., Kleinknecht, N., & Schmidt, S. (2006). Measuring mindfulness—The Freiburg Mindfulness Inventory (FMI). *Personality and Individual Differences, 40*(8), 1543-1555. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2005.11.025>
- Walhovd, K. B., Fjell, A. M., Brown, T. T., Kuperman, J. M., Chung, Y., Hagler, D. J., Roddey, J. C., Erhart, M., McCabe, C., Akshoomoff, N., Amaral, D. G., Bloss, C. S., Libiger, O., Schork, N. J., Darst, B. F., Casey, B. J., Chang, L., Ernst, T. M., Frazier, J., ... for the Pediatric Imaging, N. (2012). Long-term influence of normal variation in neonatal characteristics on human brain development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208180109>
- Wallace, R., Benson, H., & Wilson, A. (1971). A wakeful hypometabolic physiologic state. *American Journal of Physiology-Legacy Content, 221*(3), 795-799. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1971.221.3.795>
- Walsh, R., & Shapiro, S. L. (2006). The meeting of meditative disciplines and Western psychology : A mutually enriching dialogue. *The American Psychologist, 61*(3), 227-239. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.61.3.227>
- Wang, J., Yan, R., Wen, J., Kong, X., Li, H., Zhou, P., Zhu, H., Su, X., & Ma, J. (2017). Association of lower body mass index with increased glycemic variability in patients with newly diagnosed type 2 diabetes : A cross-sectional study in China. *Oncotarget, 8*(42), 73133-73143. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.17111>
- Wang, Q., Chen, C., Cai, Y., Li, S., Zhao, X., Zheng, L., Zhang, H., Liu, J., Chen, C., & Xue, G. (2016). Dissociated neural substrates underlying impulsive choice and impulsive action. *NeuroImage, 134*, 540-549. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.04.010>
- Wang, Y., Braver, T. S., Yin, S., Hu, X., Wang, X., & Chen, A. (2019). Reward improves response inhibition by enhancing attentional capture. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 14*(1), 35-45. <https://doi.org/10.1093/scan/nsy111>
- Wass, S. V. (2015). Applying cognitive training to target executive functions during early development. *Child Neuropsychology, 21*(2), 150-166. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.882888>
- Waterhouse, J., Minors, D., Atkinson, G., & Benton, D. (1997). Chronobiology and meal times : Internal and external factors. *The British Journal of Nutrition, 77 Suppl 1*, S29-38. <https://doi.org/10.1079/bjn19970102>

- Wathugala, M., Saldana, D., Juliano, J. M., Chan, J., & Liew, S.-L. (2019). Mindfulness Meditation Effects on Poststroke Spasticity : A Feasibility Study. *Journal of Evidence-Based Integrative Medicine*, 24, 2515690X19855941. <https://doi.org/10.1177/2515690X19855941>
- Wehrens, S. M. T., Christou, S., Isherwood, C., Middleton, B., Gibbs, M. A., Archer, S. N., Skene, D. J., & Johnston, J. D. (2017). Meal Timing Regulates the Human Circadian System. *Current Biology*, 27(12), 1768-1775.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.059>
- Wei, X., Yin, Y., Rong, M., Zhang, J., Wang, L., Wu, Y., Cai, Q., Yu, C., Wang, J., & Jiang, T. (2017). Paracingulate Sulcus Asymmetry in the Human Brain : Effects of Sex, Handedness, and Race. *Scientific Reports*, 7(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/srep42033>
- Weise, C. M., Bachmann, T., Schroeter, M. L., & Saur, D. (2019). When less is more : Structural correlates of core executive functions in young adults -A VBM and cortical thickness study. *NeuroImage*, 189, 896-903. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.070>
- Weiss, S. M., Meltzoff, A. N., & Marshall, P. J. (2018). Neural measures of anticipatory bodily attention in children : Relations with executive function. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 34, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.08.002>
- Welker, W. I. (1990). The significance of foliation and fissuration of cerebellar cortex. The cerebellar folium as a fundamental unit of sensorimotor integration. *Archives Italiennes De Biologie*, 128(2-4), 87-109.
- Wen, X., Zhang, Q., Liu, X., Du, J., & Xu, W. (2021). Momentary and longitudinal relationships of mindfulness to stress and anxiety among Chinese elementary school students : Mediations of cognitive flexibility, self-awareness, and social environment. *Journal of Affective Disorders*, 293, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.06.038>
- Wessel, J. R., & Aron, A. R. (2014). Inhibitory motor control based on complex stopping goals relies on the same brain network as simple stopping. *NeuroImage*, 103, 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.09.048>
- Westlye, L. T., Grydeland, H., Walhovd, K. B., & Fjell, A. M. (2011). Associations between Regional Cortical Thickness and Attentional Networks as Measured by the Attention Network Test. *Cerebral Cortex*, 21(2), 345-356. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq101>
- Wheeler, M. S., Arnkoff, D. B., & Glass, C. R. (2016). What is being studied as mindfulness meditation? *Nature Reviews Neuroscience*. <https://doi.org/10.1038/nrn.2015.6>
- White, C. N., Congdon, E., Mumford, J. A., Karlsgodt, K. H., Sabb, F. W., Freimer, N. B., London, E. D., Cannon, T. D., Bilder, R. M., & Poldrack, R. A. (2014). Decomposing Decision Components in the Stop-signal Task : A Model-based Approach to Individual Differences in Inhibitory Control. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(8), 1601-1614. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00567](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00567)
- WHO, W. H. O. (2011). [http://www.who.int/growthref/who2007\\_bmi\\_for\\_age/en/](http://www.who.int/growthref/who2007_bmi_for_age/en/).
- Wiebe, S. A., Sheffield, T. D., & Andrews Espy, K. (2012). Separating the fish from the sharks : A longitudinal study of preschool response inhibition. *Child Development*, 83(4), 1245-1261. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01765.x>
- 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>
- Wierenga, L. M., Bos, M. G. N., van Rossenberg, F., & Crone, E. A. (2019). Sex Effects on Development of Brain Structure and Executive Functions : Greater Variance than Mean Effects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(5), 730-753. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01375](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01375)
- Wilkey, E. D., Pollack, C., & Price, G. R. (2020). Dyscalculia and Typical Math Achievement Are Associated With Individual Differences in Number-Specific Executive Function. *Child Development*, 91(2), 596-619. <https://doi.org/10.1111/cdev.13194>
- Wilkinson, H. R., Smid, C., Morris, S., Farran, E. K., Dumontheil, I., Mayer, S., Tolmie, A., Bell, D., Porayska-Pomsta, K., Holmes, W., Mareschal, D., Thomas, M. S. C., & UnLocke Team. (2020). Domain-Specific Inhibitory Control Training to Improve Children's Learning of Counterintuitive Concepts in Mathematics and Science. *Journal of Cognitive Enhancement: Towards the*

- Integration of Theory and Practice*, 4(3), 296-314. <https://doi.org/10.1007/s41465-019-00161-4>
- Williams, J. M. G., Russell, I., & Russell, D. (2008). Mindfulness-Based Cognitive Therapy. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 76(3), 524-529. <https://doi.org/10.1037/0022-006X.76.3.524>
- Wilson, J., Andrews, G., Hogan, C., Wang, S., & Shum, D. H. K. (2018). Executive function in middle childhood and the relationship with theory of mind. *Developmental Neuropsychology*, 43(3), 163-182. <https://doi.org/10.1080/87565641.2018.1440296>
- Wilson, S. P., & Kipp, K. (1998). The Development of Efficient Inhibition : Evidence from Directed-Forgetting Tasks. *Developmental Review*, 18(1), 86-123.
- Wisco, J. J., Kuperberg, G., Manoach, D., Quinn, B. T., Busa, E., Fischl, B., Heckers, S., & Sorensen, A. G. (2007). Abnormal cortical folding patterns within Broca's area in schizophrenia : Evidence from structural MRI. *Schizophrenia research*, 94(1-3), 317-327. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2007.03.031>
- Wisner, B. L. (2014). An Exploratory Study of Mindfulness Meditation for Alternative School Students : Perceived Benefits for Improving School Climate and Student Functioning. *Mindfulness*, 5(6), 626-638. <https://doi.org/10.1007/s12671-013-0215-9>
- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H., & Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development : Typical developmental trends. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 44(4), 561-575.
- Wu, F., Guo, Y., Zheng, Y., Ma, W., Kowal, P., Chatterji, S., & Wang, L. (2016). Social-Economic Status and Cognitive Performance among Chinese Aged 50 Years and Older. *PLoS ONE*, 11(11), e0166986. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166986>
- Wu, R., Liu, L.-L., Zhu, H., Su, W.-J., Cao, Z.-Y., Zhong, S.-Y., Liu, X.-H., & Jiang, C.-L. (2019). Brief Mindfulness Meditation Improves Emotion Processing. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1074. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01074>
- Wynne, A. (2007). *The Origin of Buddhist Meditation*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203963005>
- Xia, T., Hu, H., Seritan, A. L., & Eisendrath, S. (2019). The Many Roads to Mindfulness : A Review of Nonmindfulness-Based Interventions that Increase Mindfulness. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 25(9), 874-889. <https://doi.org/10.1089/acm.2019.0137>
- Yamada, K., & Victor, T. (2012). The Impact of Mindful Awareness Practices on College Student Health, Well-Being, and Capacity for Learning : A Pilot Study. *Psychology Learning & Teaching*, 11, 139. <https://doi.org/10.2304/plat.2012.11.2.139>
- Yang, J., Benyamin, B., McEvoy, B. P., Gordon, S., Henders, A. K., Nyholt, D. R., Madden, P. A., Heath, A. C., Martin, N. G., Montgomery, G. W., Goddard, M. E., & Visscher, P. M. (2010). Common SNPs explain a large proportion of heritability for human height. *Nature genetics*, 42(7), 565-569. <https://doi.org/10.1038/ng.608>
- Yang, Y., Shields, G. S., Guo, C., & Liu, Y. (2018). Executive function performance in obesity and overweight individuals : A meta-analysis and review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 84, 225-244. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.11.020>
- Yu, X., Cohen, Z. P., Tsuchiyagaito, A., Cochran, G., Aupperle, R. L., Stewart, J. L., Singh, M. K., Misaki, M., Bodurka, J., Paulus, M. P., & Kirlic, N. (2022). Neurofeedback-Augmented Mindfulness Training Elicits Distinct Responses in the Subregions of the Insular Cortex in Healthy Adolescents. *Brain Sciences*, 12(3), Art. 3. <https://doi.org/10.3390/brainsci12030363>
- Yuan, J. P., Connolly, C. G., Henje, E., Sugrue, L. P., Yang, T. T., Xu, D., & Tymofiyeva, O. (2020). Gray Matter Changes in Adolescents Participating in a Meditation Training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2020.00319>
- Yuan, W., Ke, L. I., Xiaosong, G. a. I., & Yifei, C. a. O. (2020). Training and transfer effects of response inhibition training with online feedback on adolescents and adults' executive function. *Acta Psychologica Sinica*, 52(10), 1212. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2020.01212>



- Yücel, M., Stuart, G. W., Maruff, P., Velakoulis, D., Crowe, S. F., Savage, G., & Pantelis, C. (2001). Hemispheric and Gender-related Differences in the Gross Morphology of the Anterior Cingulate/Paracingulate Cortex in Normal Volunteers : An MRI Morphometric Study. *Cerebral Cortex*, *11*(1), 17-25. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.1.17>
- Yücel, M., Wood, S. J., Phillips, L. J., Stuart, G. W., Smith, D. J., Yung, A., Velakoulis, D., McGorry, P. D., & Pantelis, C. (2003). Morphology of the anterior cingulate cortex in young men at ultra-high risk of developing a psychotic illness. *The British Journal of Psychiatry: The Journal of Mental Science*, *182*, 518-524. <https://doi.org/10.1192/bjp.182.6.518>
- Zabelina, D. L., Friedman, N. P., & Andrews-Hanna, J. (2019). Unity and diversity of executive functions in creativity. *Consciousness and Cognition*, *68*, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.12.005>
- Zajonc, R. B. (1965). Social facilitation. *Science*, *149*(Whole No. 3681), 269-274. <https://doi.org/10.1126/science.149.3681.269>
- Zareyan, S., Zhang, H., Wang, J., Song, W., Hampson, E., Abbott, D., & Diamond, A. (2021). First Demonstration of Double Dissociation between COMT-Met158 and COMT-Val158 Cognitive Performance When Stressed and When Calmer. *Cerebral Cortex*, *31*(3), 1411-1426. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa276>
- Zelazo, P. D. (2008). The Development of Executive Function in Childhood. In *Handbook of Developmental Cognitive Neuroscience*. The MIT Press). Charles A. Nelson, Monica Luciana.
- Zelazo, P. D., & Carlson, S. M. (2012). *Hot and Cool Executive Function in Childhood and Adolescence : Development and Plasticity*. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2012.00246.x>
- Zelazo, P. D., & Cunningham, W. A. (2007). Executive Function : Mechanisms Underlying Emotion Regulation. In *Handbook of emotion regulation* (p. 135-158). The Guilford Press.
- Zelazo, P. D., Frye, D., & Rapus, T. (1996). An age-related dissociation between knowing rules and using them. *Cogn. Dev*, *11*, 37-63.
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002a). Executive function in typical and atypical development. In *Blackwell handbook of childhood cognitive development* (p. 445-469). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470996652.ch20>
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002b). The balance beam in the balance : Reflections on rules, relational complexity, and developmental processes. *Journal of Experimental Child Psychology*, *81*(4), 458-465. <https://doi.org/10.1006/jecp.2002.2667>
- Zelazo, P., Forston, J., Masten, A., & Carlson, S. (2018). Mindfulness Plus Reflection Training : Effects on Executive Function in Early Childhood. *Frontiers in Psychology*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00208>
- Zenner, C., Herrnleben-Kurz, S., & Walach, H. (2014). Mindfulness-based interventions in schools—A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, *5*, 603. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00603>
- Zhang, R., Geng, X., & Lee, T. M. C. (2017). Large-scale functional neural network correlates of response inhibition : An fMRI meta-analysis. *Brain Structure and Function*, *222*(9), 3973-3990. <https://doi.org/10.1007/s00429-017-1443-x>
- Zhao, X., Chen, L., Fu, L., & Maes, J. H. R. (2015). Wesley says” : A children’s response inhibition playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Frontiers in Psychology*, *6*, 207. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00207>
- Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. R. (2018). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental Science*, *21*(1), 12511. <https://doi.org/10.1111/desc.12511>
- Zhou, X., & Lei, X. (2018). Wandering Minds with Wandering Brain Networks. *Neuroscience Bulletin*, *34*(6), 1017-1028. <https://doi.org/10.1007/s12264-018-0278-7>
- Zink, N., Bensmann, W., Arning, L., Colzato, L. S., Stock, A.-K., & Beste, C. (2019). The Role of DRD1 and DRD2 Receptors for Response Selection Under Varying Complexity Levels : Implications for Metacontrol Processes. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, *22*(12), 747-753. <https://doi.org/10.1093/ijnp/pyz024>

- Zmigrod, L., & Robbins, T. W. (2021). Dopamine, Cognitive Flexibility, and IQ : Epistatic Catechol-O-MethylTransferase:DRD2 Gene-Gene Interactions Modulate Mental Rigidity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *34*(1), 153-179. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01784](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01784)
- Zsadanyi, S. E., Kurth, F., & Luders, E. (2021). The Effects of Mindfulness and Meditation on the Cingulate Cortex in the Healthy Human Brain : A Review. *Mindfulness*, *12*(10), 2371-2387. <https://doi.org/10.1007/s12671-021-01712-7>
- Zylowska, L., Ackerman, D., Yang, M., Futrell, J., Horton, N., Hale, S., & Pataki, C. (2008). Mindfulness Meditation Training in Adults and Adolescents With ADHD A Feasibility Study. *Journal of attention disorders*, *11*, 737-746. <https://doi.org/10.1177/1087054707308502>

# Annexes

## Annexes 1. Critères d'inclusion et de non inclusion dans APEX Ado.

### CRITERES DE NON INCLUSION

	OUI	NON
1. Présente des contre-indications à un examen d'IRM (pacemaker ou stimulateur neurosensoriel ou défibrillateur implantable, implants cochléaires, corps étrangers ferromagnétiques oculaires ou cérébraux proches des structures nerveuses, prothèses métalliques, agitation du malade : patients non coopérants ou agités, enfants en bas âge, sujets claustrophobes, femme enceinte, valves de dérivation neurochirurgicales ventriculopéritonéales, appareil dentaire)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Présente une prise chronique d'alcool ou de drogues	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Abus ou dépendance à des substances (sauf nicotine) ou à un toxique de plus de 5 ans ou ayant entraîné des comas (overdoses)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Présente des troubles cognitifs de survenue brutale qui pourraient témoigner d'un accident vasculaire cérébral ; un antécédent de traumatisme crânien avec perte de connaissance de plus d'1h, ou une encéphalite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Présente une affection chronique neurologique, psychiatrique, endocrinienne, hépatique ou infectieuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Présente des antécédents de maladie majeure (diabète, maladie pulmonaire chronique, désordre cardiaque, métabolique, hématologique, endocrinologique ou immunologique sévère, cancer)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Présente une prise de médicaments susceptibles d'interférer avec les mesures d'imagerie cérébrale (psychotropes, hypnotiques anxiolytiques, neuroleptiques, anti-parkinsoniens, benzodiazépines, anti-inflammatoires stéroïdiens, antiépileptiques, anti-histaminiques, antalgiques centraux et myorelaxants)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Présente une dyschromatopsie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Présente une impossibilité de se soumettre à l'étude pour des raisons géographiques ou psychiatriques	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Femmes enceintes ou allaitantes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Présente des troubles envahissants du développement et/ou des acquisitions identifiés par les parents ou tuteur légal et (ou) professeurs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. Non accompagné par le(s) parent(s) ou le tuteur légal lors de la visite à la plateforme de recherche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Présente un tatouage sur la tête, la nuque ou les épaules	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Présente une infirmité motrice cérébrale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15. Présente un trouble de la motricité fine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

→ Si une réponse OUI, le sujet ne peut être inclus dans l'étude.

### CRITERES D'INCLUSION

	OUI	NON
1. Âgé de 16 à 17 ans	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2. Fille ou garçon	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3. Langue maternelle française	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4. Scolarisé dans un niveau correspondant à son âge (2nde ou 1ère)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5. Préférence manuelle droite	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6. Consentement éclairé signé par le(s) titulaire(s) de l'autorité parentale, en accord avec l'adolescent	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7. examens médical, neurologique, neuroradiologiques normaux	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8. Affilié à un régime de sécurité sociale	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

→ Si une réponse **NON**, le sujet ne peut être inclus dans l'étude.

## **Annexe 2.** Liste de tâches réalisées dans APEX Ado.

- ANT (informatisé)
- Stroop Couleur (informatisé)
- Matrices de Raven (informatisé)
- Dot Matrice (informatisé)
- Stroop Emotion (informatisé)
- N-back spatial (informatisé)
- OBТ (informatisé)
- Stop-signal (informatisé)
- NP arithmétique (informatisé)
- NP orthographe (informatisé)
- Discounting (informatisé)
- Estimation numérique (informatisé)
- NP lecture (informatisé)
- NP conservation (informatisé)
- Global/local (informatisé)
- Simon (informatisé)
- NP flottaison (informatisé)
- Ratio bias (papier-crayon)
- TMT (papier-crayon)
- Fractions (informatisé)

### Annexe 3. Plaquette pour le recrutement dans les lycées (APEX Ado 2)



#### POUR PARTICIPER, CONTACTEZ-NOUS :

Pr. Arnaud CACHIA : [arnaud.cachia@parisdescartes.fr](mailto:arnaud.cachia@parisdescartes.fr)

Gabriela REZENDE : [gabriela.rezende@parisdescartes.fr](mailto:gabriela.rezende@parisdescartes.fr)

Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant, CNRS UMR 8240

Web : <https://www.lapsyde.com/>

*Le LaPsyDÉ est spécialisé dans l'étude du développement cognitif et cérébral. Ce laboratoire de recherche, situé à la Sorbonne, est l'un des seuls en France à combiner l'étude comportementale et l'imagerie cérébrale du développement cognitif chez le sujet sain, au cours de l'enfance et de l'adolescence.*

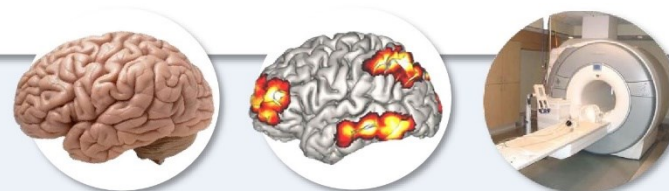


#### Projet de recherche : apprentissage au contrôle cognitif à l'adolescence

Le Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS) recherche des adolescents âgés de **16 et 17 ans** pour participer à une recherche fondamentale afin de mieux comprendre comment le cerveau apprend. C'est une occasion pour l'adolescent de découvrir le monde de la recherche scientifique sur un sujet passionnant : son propre cerveau !

La participation à cette recherche est entièrement libre et volontaire. Ce projet a été validé par le comité d'éthique d'Ile-de-France. A la fin de l'étude et en échange de leur participation, les adolescents se verront remettre **100 € bons cadeaux**.

La réalisation de ce projet **n'empiètera pas sur le temps scolaire** car il se fera en dehors du lycée : à la maison pour l'apprentissage et sur la plateforme d'imagerie pour l'IRM et la caractérisation cognitive.





## Quel est le but de cette recherche ?

L'objectif de ce projet est de mieux comprendre les changements survenant dans le cerveau des adolescents lors d'un apprentissage cognitif. Nous utilisons l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) car cette méthode permet d'étudier de manière **non invasive et indolore** les changements dans le cerveau lors de l'apprentissage. Nous nous focalisons sur le contrôle cognitif, un ensemble de fonctions cognitives du cortex préfrontal, à l'avant du cerveau, qui permettent l'utilisation au cas par cas des meilleures stratégies pour résoudre au mieux un problème. Ces fonctions sont étroitement associées à la **réussite scolaire et professionnelle**. Elles connaissent un développement tardif jusqu'à la fin de l'adolescence et sont donc **susceptibles de s'améliorer par l'effet d'un apprentissage cognitif**.

## En quoi consiste la recherche ?

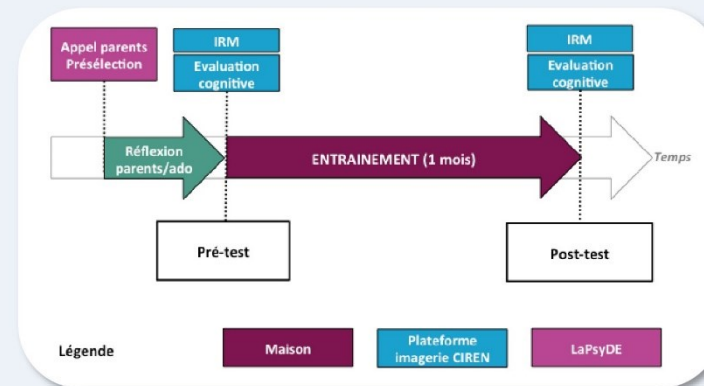
L'objectif de ce projet est simple : tester en IRM chez des adolescents l'impact au niveau cérébral et neurocognitif d'un apprentissage intensif au contrôle cognitif. Chaque participant aura à réaliser chez lui, pendant un mois, un apprentissage cognitif sur une tablette tactile (fournie pour le projet). Chaque adolescent passera également un examen d'IRM et une caractérisation cognitive, avant et après l'apprentissage.



## Comment se déroulera la recherche ?

Nous utiliserons une méthodologie classique d'apprentissage:

- Un **pré-test** : les participants passeront un premier examen d'IRM cérébrale ainsi qu'une caractérisation cognitive ;
- Un **entraînement à la maison** : 25 sessions d'apprentissage sous la forme d'un **jeu sur tablette numérique** de 15 minutes par jour pendant 1 mois ;
- Un **post-test** : les participants passeront un second examen d'IRM et une seconde caractérisation cognitive.



Les examens IRM et les caractérisations cognitives auront lieu sur la plateforme d'imagerie cérébrale de l'Université Paris Descartes (75014 Paris. M° Alésia ou M° Glacière).

## Annexe 4. Fiche explicative pour la pratique de la méditation à domicile (APEX Ado)



### Guide du vainqueur pour l'entraînement à la méditation sur tablette

---

1. **Fréquence** : Vous devez vous entraîner 5 fois par semaine. Vous déciderez de quels jours sont les plus adéquats.
2. **Heure** : Vous pouvez vous entraîner à l'heure qui vous convient le mieux, cela n'est pas important. Mais essayez de garder à peu près le même horaire durant toute la durée de l'entraînement.
3. **Conditions** : Mettez-vous dans des conditions propices pour l'entraînement, c'est-à-dire des vêtements confortables, un lieu calme, chats/chiens/perroquets à l'écart, passez aux toilettes avant.
4. **Posture** : Gardez votre colonne droite et ne vous allongez pas (sinon vous risquez fortement de dormir pendant la séance).
5. **Rattrapage** : Si vous ratez un entraînement (ça arrive, on sait), ne faites jamais deux entraînements le même jour ! Il vaut mieux rattraper la séance ratée lors de la semaine suivante.
6. **Casque** : Branchez un casque sur la tablette afin de bien entendre le son et de booster votre concentration.
7. **Raisin sec** : Il y a un exercice de méditation qui porte sur les raisins secs. Pas de panique si vous n'aimez pas les raisins secs ou si vous n'en avez pas à la maison. Dans ces cas, vous pouvez choisir un aliment sympa pour remplacer les raisins : des cacahuètes, des chips, du popcorn ! Il est important d'en avoir toujours un peu à côté de vous avant de lancer une séance car vous pouvez tomber sur cet exercice !
8. **Journal de bord** : Prenez l'habitude de remplir votre journal de bord juste après la séance car l'expérience sera encore fraîche dans votre tête. N'hésitez pas à faire de commentaires (sincères) sur votre aperçu – c'est important pour nous.

## Annexe 5.

Developmental Science

# Developmental Science

### **Differential effects of mindfulness meditation and cognitive training on cool and hot inhibitory control in children and adolescents**

Journal:	<i>Developmental Science</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	Research Article
Keywords:	inhibitory control, training, mindfulness, childhood, adolescence
Subject Area:	Childhood cognitive development

SCHOLARONE™  
Manuscripts



1  
2  
3 **DIFFERENTIAL EFFECTS OF MINDFULNESS MEDITATION AND COGNITIVE**  
4 **TRAINING ON COOL AND HOT INHIBITORY CONTROL IN CHILDREN AND**  
5 **ADOLESCENTS**  
6  
7

8 Gabriella REZENDE <sup>1</sup>, Lorna LE STANC <sup>1</sup>, Iris MENU <sup>1</sup>, Mathieu CASSOTTI <sup>1,2</sup>, Ania AITE <sup>1</sup>,  
9 Emilie SALVIA <sup>1</sup>, Olivier HOUDE <sup>1,2</sup>, Grégoire BORST <sup>1,2\*</sup>, Arnaud CACHIA <sup>1,3\*</sup>

11 <sup>1</sup> Université Paris Cité, Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de  
12 l'Enfant, UMR CNRS 8240, Paris, France

13 <sup>2</sup> Institut Universitaire de France, Paris, France

14 <sup>3</sup> Université Paris Cité, Imaging biomarkers for brain development and disorders, UMR  
15 INSERM 1266, GHU Paris psychiatrie & neurosciences, F-75005 Paris, France

16 \* Authors contributed equally  
17  
18

19 **Corresponding author:** Prof. Arnaud CACHIA

20 Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'Enfant

21 Sorbonne, 46 rue Saint-Jacques, 75005, Paris

22 Tel. / Fax: +33 (0)140462995 / +33 (0)140462993

23 arnaud.cachia@u-paris.fr  
24  
25  
26  
27

28 **RESEARCH HIGHLIGHTS:**

29 - Mindfulness meditation (MM) involves the Inhibitory control (IC) in order to maintain  
30 non-judgmental attention to present moment experiences, thus promoting self-regulation  
31 and emotional regulation.  
32

33  
34 - We investigated behavioral changes induced by a 5-week-computerized IC training (CT)  
35 versus a MM program in children (9-10-year-olds) and in adolescents (16-17 y.o.).  
36

37 - CT globally improved Cool IC performance, while MM practice improved specifically  
38 Hot IC.  
39

40 - Children benefited significantly from the interventions but not the adolescents.  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

**ABSTRACT**

Inhibitory control (IC), the ability to resist automatisms or interferences, can occur either in a neutral context (cool IC), or in social contexts involving emotions (hot IC). Cool and hot IC have specific developmental trajectories, the cool IC performance linearly improving from childhood to adulthood and the hot IC capacities following a non-linear, quadratic trajectory. Several studies have reported that some activities can improve the IC, including Cognitive Training (CT) and Mindfulness meditation (MM). The aim of our study was to compare the effects of 5 weeks of computerized MM vs. CT on IC abilities in 66 children (9-10 y.o.) and 63 adolescents (15-17 y.o.) by specifically analyzing the cool and hot dimensions in the same participants and in a developmental perspective. We fit a linear mixed-effect model on the Stroop interference score with Time (Pre-test vs Post-test) and Type of conflict (Cool vs Hot) as within-subject factors, Intervention group (CT vs MM) and Age group (Child vs. Adolescent) as between-subject factors. The findings revealed that CT globally improved Cool IC but not Hot IC while MM practice improved Hot IC but not Cool IC. In addition, children were found to improve Hot IC following MM and Cool IC after CT. No significant effects were reported in adolescents. This study supports the benefits of MM at young ages and open educational perspectives focused on emotion regulation skills. Integrating MM practices into schools may be key to improve soft skills, including empathy, that can reduce misbehavior while improving school well-being.

**Key words:**

inhibitory control, training, mindfulness, childhood, adolescence

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

## 1. INTRODUCTION

Inhibitory control (IC) is an Executive Function related to the ability to resist automatism, temptations, distractions or interferences and to adapt to conflicting situations. It is a core mechanism of cognitive and social-emotional development (Borst, Aïte, et al., 2015). Several studies have shown that IC abilities in childhood and adolescence predict later academic and professional success and social adjustment (Diamond, 2013; Kim et al., 2013; Moffitt et al., 2011). The development of complex skills, such as reading (Ahr et al., 2016, 2017; Borst, Ahr, et al., 2015; Brault Foisy, 2015), arithmetic (Blair & Razza, 2007; Roell et al., 2017, 2019, 2019; Viarouge et al., 2019), reasoning (Borst, Aïte, et al., 2015; Houdé, 2014), theory of mind (Aïte et al., 2016; Draperi et al., 2022; Marcovitch et al., 2015), decision-making (Aïte et al., 2018; De Neys et al., 2020; Osmont et al., 2014) and creativity (Camarda et al., 2018; Cassotti et al., 2016) relies on the increased efficiency of the IC. In atypical development, deficits in IC are related to several psychiatric conditions, including attention deficit and hyperactivity disorders (ADHD) (Bhaijiwala et al., 2014; Brown & Landgraf, 2010; Geurts et al., 2006), schizophrenia (Ethridge et al., 2014; Galaverna et al., 2012), and autistic spectrum disorders (Geurts et al., 2014; Padmanabhan et al., 2015).

The IC can integrate different aspects depending on the context in which it occurs. For instance, Zelazo and Carlson (2012) make a distinction between the neutral and affective aspects of IC according to the emotional context. Neutral, or cool, IC takes place in decontextualized and emotionless situations, and are required to solve problems that do not include affective components (Fernández García et al., 2021). In contrast, hot IC takes place in affective and social contexts involving motivation and emotion (Aïte et al., 2018; Bouhours et al., 2021; Metcalfe & Mischel, 1999). Hot IC abilities correlate with emotion regulation (Carlson & Wang, 2007), namely the ability to control, evaluate, and manage emotions (Thompson, 2018). Several studies have demonstrated that the hot IC plays a fundamental role

1  
2  
3 in emotion regulation by increasing or decreasing emotions (Cardinale et al., 2019; Carlson &  
4 Wang, 2007; Nigg, 2017; Zelazo & Cunningham, 2007), or even suppressing an affect-charged  
5 response to promote the achievement of a goal (Zelazo & Cunningham, 2007). Hot IC is also  
6 associated with the ability to attribute emotionally charged mental states to others, a cognitive  
7 ability underlying empathy (Draperi et al., 2022). Of note, the clear distinction between cool  
8 and hot IC abilities is not consensual during the early childhood (O'Toole et al., 2018;  
9 Tsermentseli & Poland, 2016). Similarly to the development of the executive functions which  
10 become progressively specific with age, some authors support a domain-general IC during  
11 preschool years with no clear distinction between cool and hot IC abilities at these early ages  
12 (Allan & Lonigan, 2014).  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25

26 Cool and hot IC develop linearly during the early childhood, in school-aged children  
27 (Hongwanishkul et al., 2005; O'Toole et al., 2017; Tsermentseli & Poland, 2016). Elementary  
28 forms of cool IC - such as motor response inhibition, withdrawal and withholding of an already  
29 triggered motor response, performance- and error-monitoring - can be observed in early  
30 childhood, and continue to progress during adolescence into adulthood (Rubia et al., 2001,  
31 2007). In parallel, hot IC skills tend to develop later and slower (Aïte et al., 2018; Kim et al.,  
32 2013). The adolescence represents a specific developmental period characterized by lower hot  
33 IC capacities than children and adults (Durstun et al., 2002; Luna, 2009). Aïte et al. (2018)  
34 reported type-specific IC developmental trajectories, the cool IC performance linearly  
35 improving from childhood to adulthood and the hot IC capacities following a non-linear,  
36 quadratic trajectory. This difference may be explained by the delay between an early maturing  
37 social-emotional system and a slower maturing cognitive control system (Casey et al., 2008).  
38 The development of the emotional system would follow an inverted U-shaped curve (Steinberg,  
39 2008, 2010), with overactive limbic-striatal subcortical processing (Luciana & Collins, 2012)  
40 and increased dopaminergic activity (Luna & Wright, 2016). Therefore, regions involved in hot  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 IC, such as the amygdala, would be particularly active in adolescents compared to children or  
4  
5 adults (Banich et al., 2019).  
6

7  
8 Several studies have reported that some activities can improve the IC (Diamond, 2013;  
9  
10 Karbach et al., 2017; Karbach & Kray, 2009; Karbach & Unger, 2014), including the  
11  
12 mindfulness meditation (MM), a form of mental training that intends to develop a set of  
13  
14 psychological abilities, such as attentional and emotional self-regulation (Tang et al., 2015). It  
15  
16 involves several cognitive functions, including IC (Fan et al., 2014; Geronimi et al., 2020; Holas  
17  
18 & Jankowski, 2013). Indeed, MM requires IC to focus on a given stimulus, such as breathing,  
19  
20 while letting go of thoughts or sensations that are distractive to achieving mindful awareness  
21  
22 (Geronimi et al., 2020). In early adolescence, Oberle et al. (2012) found that scores of  
23  
24 mindfulness attention are positively correlated to performance of cool IC. Several studies also  
25  
26 reported improved EF, including IC, following MM practice. A meta-analysis also evidenced  
27  
28 specific IC improvements after MM practice in children (Takacs & Kassai, 2019), MM being  
29  
30 more effective than programs specifically training EF. In a sample of male adolescent offenders,  
31  
32 Ron-Grajales et al. (2021) observed that MM practice is associated with decreased errors in the  
33  
34 Stroop task and also reduced aggressive behavior. Other studies in adolescents report a positive  
35  
36 effect of MM practice on emotion regulation measured by a reduction in self-reported emotional  
37  
38 disturbance (Kang et al., 2018; K. Schonert-Reichl & Lawlor, 2010). Finally, in a review,  
39  
40 Leshem et al. (2020) report that a Quadrato Motor Training – a movement training that engages  
41  
42 cool cognition and body coordination, incorporating mindfulness experiences by offering  
43  
44 awareness of physical sensations, enhanced attention and metacognition - can improve cool and  
45  
46 hot IC abilities across all ages (De Fano et al., 2019). Of note, Koncz et al. (2021) found no  
47  
48 effect of MM practice on IC in elementary school children.  
49  
50  
51  
52  
53  
54

55  
56 If previous studies have reported effects of MM practice on cool or hot IC in children or  
57  
58 adolescents separately, to our knowledge, no study has investigated the effects of MM practice  
59  
60

1  
2  
3 on IC abilities by specifically analyzing the cool and hot dimensions in the same participants  
4 and in a developmental perspective. In this context, the aim of the present study was to compare  
5 the effects on cool and hot IC after 5 weeks of MM practice versus Cognitive Training (CT)  
6 targeting IC in 129 healthy participants, including 66 school-aged children (9 - 10 years old)  
7 and 63 adolescents (15 - 17 years old). Cool and hot IC were assessed with two versions of the  
8 Stroop task, a classic word Stroop task, referred as “cool Stroop”, and an Emotional Stroop  
9 task, referred as “hot Stroop”. To our knowledge, this is the first study to compare the impact  
10 of a cognitive training and a mindfulness-based intervention on cool and hot IC dimensions in  
11 children and adolescents, providing a developmental perspective of training effects.  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24

25 Based on previous studies reporting evidence of specific developmental trajectories of  
26 cool and hot IC (Aïte et al., 2018; Prencipe et al., 2011; Zelazo & Carlson, 2012), we anticipated  
27 that the MM and CT effects will be specific to the age of the participants (children vs.  
28 adolescents) and the type of IC (cool vs. hot). More specifically, Cold IC being already highly  
29 developed in adolescents, children should benefit more from the interventions than adolescents.  
30 In addition, because of the emotional regulation involved in MM (Hölzel et al., 2011; K. A.  
31 Schonert-Reichl et al., 2015; Tang et al., 2015), MM practice should have a greater effect on  
32 hot IC than CT, which specifically target cold IC. Conversely, the effect of CT on cool CI  
33 should be stronger than the effect elicited by MM practice.  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47

## 48 **1. METHOD**

### 49 **2.1. Participants**

50 We recruited 129 healthy participants from public schools: 66 children (36 females,  $M \pm$   
51  $SD = 9.78 \pm 0.50$  years, range = 9 – 10 years) and 63 adolescents (37 females,  $M = 16.82 \pm 0.54$   
52 years, range = 16 – 17 years). Data collection occurred in France where data on ethnicity cannot  
53 legally be collected.  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 All participants were right-handed as determined by the Edinburgh Handedness Inventory  
4 (Oldfield, 1971), were born full-term, had normal or corrected-to-normal vision, had no history  
5 of neurological disease and had no cerebral abnormalities.  
6  
7

8  
9  
10 Parents or legal guardians gave written consent for the children and the adolescents, and  
11 all children and adolescents agreed to participate. All participants were tested in accordance  
12 with the national and international norms that govern the use of human research participants.  
13  
14 Our study was approved by the national ethics committee (Committee for the protection of  
15 persons, CPP) in children (ID-RCB 2015-A00383-46) and in adolescents (ID-RCB 2015-  
16 A00811-48 and RCB 2018-A03203-52).  
17  
18

19  
20 For children, 32 participants (17 females,  $M = 9.78 \pm 0.47$  years, range = 9 – 10 years)  
21 were randomly assigned to the Mindfulness Meditation practice group (MM) and 34  
22 participants (19 females,  $M = 9.78 \pm 0.54$  years, range = 9 – 10 years) to the Cognitive Training  
23 group (CT). Among adolescents, 31 participants (16 females,  $M = 17.00 \pm 0.51$  years, range =  
24 16 – 17 years) took part in the MM group and 32 participants (16 females,  $M = 16.64 \pm 0.50$   
25 years, range = 16 – 17 years) in the CT group (see **Figure 1**). Twenty participants (10 children  
26 and 10 adolescents) did not follow the training sessions as recommended, i.e. they performed  
27 less than 15 training sessions (for CT, 15 sessions in average across both types of training tasks)  
28 in 5 weeks. In addition, two participants (1 child and 1 adolescent) dropped out during the  
29 follow-up. See Tables 1 and 2 and Figure 1 for detailed demographic and cognitive data at  
30 baseline  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## 2.2. Interventions

Participants were asked to perform at home either mindfulness meditation (MM group) or classic IC tasks (CT group) 15 min per day, 5 days a week for 5 weeks (25 sessions). The MM and CT were performed on a tactile tablet using E-prime 2.0 (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA). In both MM and CT interventions, children and adolescents were all naive to the exercises at baseline and had the same intervention design for comparison purposes.

The MM intervention consisted in eight classic mindfulness exercises audio-recorded, adapted to the young public. Each exercise requires a different facet of mindfulness. Similar to IC training, MM exercises were ordered by increased difficulty, ranging from simple breathing practice to more complex skills such as compassion. Each of the following exercises lasted about seven minutes. a) *Yoga and mindfulness*: it aims to reinforce sensory awareness. The participant lies down, stretches his/her arms and legs, and focus on the body sensations; b) *Breathing*: one focuses on their breath as a support for sustained attention; c) *Attentive listening*: it aims to reinforce auditory awareness, including intermittent sounds (a bell ringing) or continuous sounds (rain falling) ; d) *Contemplation*: the participant focuses on the visual details of the scene, such as the color or the form of objects ; e) *Body and relaxation*: one imagines an animal touching a part of their body. Relaxation is attained for each part, one by one, until a complete sensation of well-being; f) *The five senses*: sight, hearing, smell, taste and touch are used to discover a specific food. This exercise allows the participant to have a holistic perception of the situation; g) *Compassion*: it aims to promote the perception of the surrounding world as a whole, working on empathy and nonjudgmental thoughts towards others.

In CT intervention, participants performed two tasks involving different aspects of IC, namely an interference control task (*Color-Word Stroop task*) that requires the inhibition of a task-irrelevant information; and a response inhibition task (*SST*) in which a motor response must be inhibited after it was initiated. The difficulty was adapted in real time to the learning



1  
2  
3 curve of each participant to maintain the motivation and to prevent automaticity (Buschkuohl  
4 et al., 2012; Green & Bavelier, 2008; Klingberg, 2010). Precisely, the difficulty was increased  
5 when participants achieved 90% accuracy on a given level, decreased when participants failed  
6 to achieve 70% accuracy on a given level and remained the same when participants reached  
7 accuracy between 70% to 90% on a given level. On each task of each training session,  
8 participants started the session with the difficulty level one level below the one they achieved  
9 on the last level of the previous training session.  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18

19 All participants were asked to complete each day a short auto-evaluation of their  
20 motivation and engagement during the intervention. A telephone follow-up by the  
21 experimenters occurred at least every week to ensure the smooth running of the training.  
22  
23  
24  
25  
26  
27

### 28 **2.3. IC evaluation**

29  
30 Cool and hot IC were assessed using the Cool and Hot Stroop tasks respectively (see task-  
31 specific details below), following the protocol detailed in Aïte et al. (2018). Both tasks were  
32 presented on HP laptop computers with a screen resolution of 1366\*768 pixels, (310\*170 mm<sup>2</sup>)  
33 and a refresh rate of 60 Hz using the E-Prime 2.0 software. For all participants, the Cool Stroop  
34 task was followed by the Hot Stroop task to minimize interindividual variability caused by an  
35 order effect.  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43

44 No more than four congruent or incongruent stimuli could occur in a row in each block  
45 of each Stroop task.  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

### 2.3.1. Cool IC

In the Cool Stroop task, we designed 16 items that combined four different color names in French ('rouge' for red; 'bleu' for blue; 'vert' for green and 'jaune' for yellow) with the four corresponding ink colors (RGB color codes 255;0;0, 0;0;255, 0;255;0, 0;0;255, and 255;255;0). Four items were congruent (e.g., 'blue' written in blue) and 12 items were incongruent (e.g., 'blue' written in red). Each word was shaped in 24-pt Courier New bold type and presented on a gray background (RGB code 135;135;135) in the center of the screen.

The first 16 items practice block helped to familiarize the participants with the response buttons. In this part, each color appeared four times. The second block consisted of eight congruent and eight incongruent items, presented in a random order. In the two experimental blocks of 64 trials (32 congruent and 32 incongruent items with no more than four congruent or incongruent items could occur in a row.), participants were instructed to identify the ink color while ignoring the meaning of the written word. The 's' button on the keyboard was to be pressed for yellow and blue ink colors and the 'l' button, for red and green ink colors. Each trial started with the presentation of a fixation dot in the center of the screen for 1500 ms followed by a congruent or incongruent item displayed until the participants pressed one of the two response buttons with a time limit of 3000 ms. Response time (RT) was measured from the item onset to the button press.

### 2.3.2. Hot IC

For the Hot Stroop task we designed 16 items by combining four black-and-white photographic images from the NimStim set of facial expressions (Tottenham et al., 2009), representing four different emotions, i.e. happiness, anger, sadness and fear, of two males and two females to four emotional words, written in capital letters in 32-pt Courier New in French (e.g., "HAPPY", "ANGRY", "SAD", and "FEAR"). Four congruent items (e.g., the

1  
2  
3 fearful face with the French equivalent of 'FEAR' presented underneath) and 12 incongruent  
4 items (e.g., the fearful face with the French word 'HAPPY' written underneath). As for the as  
5 the Cool Stroop task, images appeared in the center of the screen on a gray background (RGB  
6 code 135;135;135). The first block of 16 items practice consisted in the four faces shown four  
7 times. In the second block of 16 trials, eight congruent and eight incongruent items were  
8 presented in a random order, as it is in the experimental blocks.  
9

10  
11  
12 In the two experimental blocks of 64 trials (32 congruent and 32 incongruent items with  
13 no more than four congruent or incongruent items could occur in a row.), participants were  
14 instructed to indicate the emotion of the facial expressions while ignoring the written words.  
15 Responses were given manually by pressing the 'd' button for happiness and sadness, and the  
16 'k' button for anger and fear. Each trial started with the presentation of a fixation dot in the  
17 center of the screen for 1500 m followed by a congruent or incongruent item displayed until the  
18 participants pressed one of the two response buttons with a time limit of 3000 ms. Response  
19 time (RT) was measured from the item onset to the button press.  
20  
21

22  
23 Of note, the actual affective dimension of emotional Stroop tasks has been discussed (e.g.  
24 Algom et al., 2004). An MRI study using the Hot Stroop task in adolescents has provided  
25 evidence of actual, specific processing of emotional information elicited by the task (Fehlbaum  
26 et al., 2018). The Hot Stroop would capture emotion-related processes beyond the more general  
27 cognitive abilities (Smolker et al., 2022).  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50

### 51 **1.1. Statistical analyses**

52  
53  
54  
55

56 For each task, we averaged separately the RTs on correctly performed congruent and  
57 incongruent items. Note that we averaged RTs only on incongruent items with both perceptual  
58  
59  
60

1  
2  
3 and motor incongruency (response button different for target and distractor) were considered,  
4  
5 since for trials with only perceptual incongruency (response button identical for target and  
6  
7 distractor), it is impossible to decipher whether a correct button response is based on the  
8  
9 pertinent information to process (ink color or facial expression) or the non-pertinent one  
10  
11 (meaning of the word or emotional word).  
12  
13

14 For each Condition (Congruent / Incongruent), Type of conflict (Cool / Hot) and Time  
15  
16 (Pre-test / Post-test), RTs were cleaned within and between subjects: values lower than median  
17  
18 – 2.5 MAD (Median Absolute Deviation) or greater than median + 2.5 MAD were considered  
19  
20 outliers.  
21  
22

23 We then fitted a linear mixed-effect model on the Stroop score with Time (Pre-test vs  
24  
25 Post-test) and Type of conflict (Cool vs Hot) as within-subject factors, Intervention group (CT  
26  
27 vs MM) and Age group (Child vs. Adolescent) as between-subject factors and participants as a  
28  
29 random factor. Such mixed-effect models are adapted to handle missing data in repeated-  
30  
31 measure designs. We then ran an analysis of variance to assess main effects and their  
32  
33 interactions, followed by FDR-corrected post-hoc comparisons. We also *a priori* tested Time-  
34  
35 related effect for each Age- and Intervention-group and each Type of conflict using FDR-  
36  
37 corrected planned comparisons.  
38  
39  
40  
41

42 The main effects and interactions were probed with Wald chi-square tests, post-hoc tests  
43  
44 and planned comparisons with Z tests. A two-tailed p-value of less than .05 was considered  
45  
46 statistically significant. All statistical analyses were carried out with the R 4.1.0 software  
47  
48 (<http://www.r-project.org/>) and the ‘tidyverse’, ‘car’, ‘multcomp’ and ‘lme4’ packages for data  
49  
50 handling and analysis of mixed-effect linear models.  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## 2. RESULTS

As expected, there was no difference between the Intervention groups prior to intervention neither for the Cool Stroop Task – Children:  $Z = 1.55, p = 0.12$ , and Adolescents:  $Z = -0.81, p = 0.42$  - nor for the Hot Stroop task – Children:  $Z = -0.31, p = 0.76$ , and Adolescents:  $Z = -0.80, p = 0.43$ .

The mixed-effect model on the interference Stroop scores (RT difference between incongruent and congruent conditions) revealed a significant main effect of the Age group  $\chi^2(1) = 4.94, p < 0.05$ , with better performances in Adolescents compared to Children (**Figure 2**), as well as a significant main effect of the Time,  $\chi^2(1) = 12.66, p < 0.001$ , with better performances at the Post-test compared to the Pre-test session.

The analyses also revealed a significant three-way interaction between the Time, the Type of conflict and the Intervention group,  $\chi^2(1) = 4.42, p = 0.04$ , indicating different Time-related changes according to the Intervention group and the Type of conflict. Moreover, there was a significant two-way interaction between the Time and the Age group,  $\chi^2(1) = 4.66, p = 0.03$ , with age-specific Time-related changes (**Figure 2**). The other main and interactive effects were not significant (all  $ps > 0.20$ ).

Post-hoc comparisons revealed that children's IC efficiency improved from the pre- to the posttest ( $\beta = -57.24 \pm 14.18, Z = -4.04, p_{FDR} < 0.001$ ) but not adolescents' IC efficiency ( $\beta = -13.38 \pm 14.45, Z = -0.93, p_{FDR} = 0.35$ ) (**Figure 2**). In addition, children's IC efficiency was lower (higher Stroop score) than adolescents' IC efficiency on the pre ( $\beta = -43.57 \pm 14.20, Z = -3.07, p_{FDR} < 0.01$ ) but not on the posttest ( $\beta = 0.31 \pm 15.84, Z = 0.02, p_{FDR} = 0.98$ ). Finally, CT showed a trend effect on improving Cool IC ( $\beta = -41.33 \pm 20.27, Z = -2.04, p_{FDR} = 0.09$ ) but no effect on Hot IC efficiency ( $\beta = -14.60 \pm 20.13, Z = -0.73, p_{FDR} = 0.48$ ) while MM improved

1  
2  
3 significantly Hot IC ( $\beta = -71.32 \pm 20.35$ ,  $Z = -3.51$ ,  $p_{FDR} < 0.01$ ) but not Cool IC ( $\beta = -13.99 \pm$   
4  
5 20.03,  $Z = -0.70$ ,  $p_{FDR} = 0.48$ ) efficiency.  
6

7  
8 Planned comparisons regarding Time-related changes for each Age- and Intervention-  
9  
10 group and each Type of conflict (**Figure 3**) revealed that children's Hot IC efficiency improved  
11  
12 from the pre- to posttest following MM ( $\beta = -88.99 \pm 29.42$ ,  $Z = -3.02$ ,  $p_{FDR} < 0.01$ ), and  
13  
14 children's Cool IC efficiency improved from the pre- to posttest following CT ( $\beta = -85.04 \pm$   
15  
16 27.30,  $Z = -3.11$ ,  $p_{FDR} < 0.01$ ). In adolescents, analyses indicated a small change on Hot IC  
17  
18 efficiency from the pre- to the posttest following MM ( $\beta = -53.66 \pm 28.11$ ,  $Z = -1.91$ ,  $p = 0.05$ ),  
19  
20 but this effect did not survive FDR-correction for multiple comparisons ( $p_{FDR} = 0.15$ ). The other  
21  
22 Time-related changes were not significant (all  $p_{FDR} > 0.54$ ).  
23  
24  
25  
26  
27

28 All the details regarding the Stroop score along with RT in congruent and incongruent  
29  
30 conditions in the different age and intervention groups for cool and hot Stroop tasks can be  
31  
32 found in **Table 1**.  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

#### 4. DISCUSSION

In this study, we examined the effect of two interventions, mindfulness meditation and cognitive IC training, on cognitive (cool) and emotional (hot) inhibitory control in typically developing children and adolescents. In children, cool IC efficiency improved after training cool IC abilities and hot IC efficiency improved after mindfulness meditation practice. Adolescents benefited less than children from both types of training, in line with previous studies (Constantinidis & Luna, 2019; Geier & Luna, 2012; Karbach, 2008; Karbach & Kray, 2009). Such findings provide evidence of age- and intervention-specific effects on cool and hot IC abilities in children and adolescents.

The design of the present study takes into account the recommendations raised for executive training studies (Karbach, 2016). First, the computerized training was performed on a standard tactile tablet so that it could be easily integrated into the participant's daily routine. This aspect was found to be particularly beneficial for the mindfulness intervention, as it could be conducted in quiet, spacious environments, chosen by the participants themselves, where they felt comfortable, in privacy, to perform the exercises. Second, the cognitive IC training and the assessment task of cool IC were somewhat different in order to distinguish actual improvements from the mere training effect of the task (Aydumne et al., 2019; Traverso et al., 2015). Third, it is important to mention that the cool and hot IC skills were both assessed with two different versions of the same task, in order to limit, as much as possible, the potential biases.

Our findings revealed positive effects of MM on hot IC abilities, especially in children. Because hot IC and emotion regulation are intrinsically related (Goeleven et al., 2006; Zelazo & Cunningham, 2007), our results are consistent with previous studies reporting positive effects of mindfulness on empathy and compassionate behavior, two prosocial skills depending on

1  
2  
3 emotional regulation and self-regulation (Creswell, 2017; Tang et al., 2015; Lamothe et al.,  
4  
5 2016; Laneri et al., 2017; Rosenberg et al., 2015). Indeed, some studies found that interpersonal  
6  
7 skills, prosocial behavior, compassion and empathy improved more following mindfulness-  
8  
9 based interventions than regular social responsibility program (Creswell, 2017; Schonert-  
10  
11 Reichl et al., 2015). For example, in a 4-month school-based randomized controlled trial with  
12  
13 children aged 9-11 years, Schonert-Reichl et al. (2015) found that a program called MindUP,  
14  
15 including mindfulness meditation exercises, improved prosocial behavior more than a regular  
16  
17 social program. Recently, [Dunning et al. \(2022\)](#) conducted a meta-analysis of randomized  
18  
19 controlled trials of mindfulness-based programs in children and adolescents (<19 years old),  
20  
21 including a sufficient number of powered studies and studies with a follow-up. Across all trials,  
22  
23 these interventions resulted in small but significant improvements, relative to passive control  
24  
25 groups, in the ability to intentionally direct attention to present-moment experiences (i.e., the  
26  
27 mindfulness dimension), as well as in executive function, attention, negative behaviors (e.g.,  
28  
29 aggression), depression, and anxiety/stress, but not well-being or prosocial behavior (e.g.,  
30  
31 empathy). Compared to active control groups, these interventions improved only the  
32  
33 mindfulness dimension and anxiety symptoms, confirming a previous meta-analysis (D. L.  
34  
35 Dunning et al., 2019). Hence, these programs were effective in improving stress, attention,  
36  
37 executive function, negative behaviors, and social behaviors, only compared to passive control  
38  
39 groups. The authors also highlight a general overestimation of the effects of mindfulness  
40  
41 meditation-based interventions, as they are subject to potential risks of bias, such as publication  
42  
43 bias. Thus, the benefits of mindfulness on cognition and well-being were considered "low" or  
44  
45 "very low" considering the set of studies reviewed ([Dunning et al., 2022](#)).

52  
53  
54 In contrast, the present study supports the benefits of meditation intervention in  
55  
56 improving emotion regulation. This is particular important in a school setting. Mindfulness  
57  
58 interventions at school may produce positive effects against bullying in children (Faraji et al.,  
59  
60



1  
2  
3 2019) and adolescents (Liu et al., 2021), antisocial behaviors, a major concern in school. In a  
4  
5 recent study, Kuroda et al. (2022) provided evidence that the trait mindfulness, also known as  
6  
7 dispositional mindfulness (Tang, 2017), was positively associated with enjoyment of learning  
8  
9 and negatively associated with anxiety and mind-wandering in college setting. Acting with  
10  
11 awareness supports bottom-up self-regulation of learning: it promotes learner's attention in a  
12  
13 moment-by-moment processing, which can prevent mind-wandering and indirectly increase  
14  
15 positive emotions (Killingsworth & Gilbert, 2010), like the enjoyment of learning. Similar  
16  
17 benefits were observed in an 8-week school-based mindfulness meditation program for  
18  
19 alternative high school students – including improved stress management skills, self-awareness,  
20  
21 emotional coping, and the capacity of paying attention – which was found to improve school  
22  
23 climate and enhanced the class engagement (Wisner, 2014). Such benefits on intrapersonal and  
24  
25 psychosocial aspects are crucial in this type of school environment often characterized by high  
26  
27 dropout rates (Doll et al., 2013). Of note, a recent review (Sleilaty, 2022) also highlights that  
28  
29 mindfulness practice in schools can have effects not only on students but also on educators. The  
30  
31 most consistent effects were reported on well-being, with a decrease in stress, anxiety, and  
32  
33 depression. Overall results also indicated significant effects on educators' emotion regulation  
34  
35 and compassion, which may also have an impact on social climate in the school setting.  
36  
37 Conversely, recent results from the 'My Resilience in Adolescence' (MYRIAD) project, a large  
38  
39 cluster randomized controlled trial, support the lack of effect of mindfulness practice on the  
40  
41 mental health of adolescents averaging 14 years old Montero-Marín et al. (2022). This study  
42  
43 also focuses on the negative effects observed in adolescents with existing or emerging mood  
44  
45 disorders, mindfulness may then reinforce negative thoughts during depressive states (Montero-  
46  
47 Marín et al., 2022). It is worth noting that the results reported by the MYRIAD study may  
48  
49 depend on how the mindfulness practice was implemented in the schools by the teachers, as  
50  
51 well as the sample tested.  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

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

Furthermore, some suggestions were put forth by studies based on the MYRIAD trial to increase the effectiveness and sustainability of mindfulness interventions, especially in schools (Kuyken et al., 2022; Montero-Marín et al., 2022). For example, external influences on youth well-being, such as social inequality, are major determinants of mental health at the societal level. At the school level, facilitators and barriers to program implementation are critical to achieving an optimal design. At the level of the intervention itself, fidelity, credibility, and commitment can determine outcomes. For students, mental health status and age/developmental stage, as well as personal trajectories, are crucial to the design and implementation of a mindfulness program (Montero-Marín et al., 2022). Consistent with the above suggestions, a recent meta-analysis (D. Dunning et al., 2022) stressed the moderators of the effects of mindfulness-based interventions in schools. The authors reported that more mindfulness practice resulted in greater improvement, as results are dose-dependent. Moreover, age is a significant moderator of changes in anxiety/stress, mindfulness, social behavior such as empathy, and negative behavior such as aggression. Of note, children tend to benefit more than adolescents from these interventions (D. Dunning et al., 2022).

Our study also suggests that CT may be particularly beneficial for children, consistent with previous evidence that children in the same age range as ours (8-12 years) can show great improvement in IC after cognitive training specifically targeting inhibition skills (Diamond & Lee, 2011). Alongside this, a potential limitation of our study is the lack of an assessment of far transfer, which is important for understanding the role of training beyond trained abilities, and especially when the proposed training is conceivable in the school setting. Indeed, converging evidence supports that IC training can improve certain academic abilities in typically developing children (Karch, 2016). For example, Wilkinson et al. (2020) integrated IC training into school mathematics and science National Curriculum in England. This

1  
2  
3 intervention aimed at training children to use their IC skills in the classroom (e.g. exercising  
4 withholding pre-potent responses to counterintuitive concepts). Far transfer effects were  
5 observed after the intervention, i.e., some children were able to use the technique of stopping  
6 and evaluating new, never-before-seen concepts rather than memorizing the correct answers.  
7  
8  
9

10  
11  
12 In parallel, although the improvement in hot IC abilities in adolescents following  
13 mindfulness practice is supported by analyses unadjusted for multiple comparisons, this  
14 specific finding may provide preliminary evidence of specific social-emotional processing  
15 during this life stage. Converging evidence have shown that the imbalance between the control  
16 system and the socioemotional system (Ernst et al., 2006; Fuhrmann et al., 2015) may be  
17 potentially ‘rebalanced’ by interventions at adolescence that improve executive functions and  
18 self-regulation, such as mindfulness meditation (Tang et al., 2015). It is also consistent with the  
19 notion of compensation effects, i.e. lower baseline performance is related to greater training  
20 gains. Since adolescents’ performance was lower in hot IC skills compared to cool IC skills,  
21 they may have been more receptive to benefit from mindfulness practice than cognitive training,  
22 with higher gains over time (Karbach, 2016; Karbach & Unger, 2014). This is in line with the  
23 finding that mindfulness-based programs were more likely to change social behavior than cool  
24 executive functioning in late adolescence (D. Dunning et al., 2022).  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41

42 In the present study, no significant change, either in cool or hot IC, was detected in  
43 adolescents after CT training. This lack of behavioral change may be related to different factors,  
44 including baseline performance and motivation (Karbach et al., 2017). Considering that  
45 adolescents performed much better than children at the pretest, the absence of significant  
46 progress after CT may be due to the fact that 1) CT did not offer a high enough level of difficulty  
47 and/or 2) this training tapped into cognitive abilities (i.e. cool IC skills) already developed,  
48 leaving little room for progress (Karbach, 2016). Of note, the lack of change observed in the  
49 adolescent group after training is similar to the developmental studies reporting that IC skills  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 are less prone to change during adolescence than during childhood (Geier & Luna, 2012;  
4  
5 Holmboe et al., 2021; Rueda et al., 2005). Motivational factors also play a critical role in  
6  
7 cognitive training, and particularly at adolescence (Beauchamp et al., 2016, 2019) because this  
8  
9 developmental period is characterized by an increased reward reactivity (Casey et al., 2008,  
10  
11 2011; Constantinidis & Luna, 2019; Geier et al., 2010; Steinberg, 2010). To control for possible  
12  
13 bias, the display for the computerized training was the same for the children and adolescents.  
14  
15 However, the gamification may have been too childish for the adolescents, therefore limiting  
16  
17 their motivation in the course of the five-week intervention. Beauchamp et al. (2019) similarly  
18  
19 referred to a possible motivation issue to explain a lack of IC change in adolescents after a five-  
20  
21 week cognitive training intervention.  
22  
23  
24  
25

26 It is essential to highlight the originality of the present study, which is the first, to our  
27  
28 knowledge, to show that a cognitive training and a mindfulness-based intervention have  
29  
30 differential and complementary effects on cool and hot IC abilities. In the future, it may be  
31  
32 interesting to combine these two interventions to train both cool and hot IC abilities in children  
33  
34 and adolescents.  
35  
36  
37  
38  
39

## 40 5. CONCLUSION

41  
42 In conclusion, several issues need to be addressed for mindfulness interventions to be  
43  
44 effective and sustainable, as we have already underlined. However, integrating mindfulness  
45  
46 meditation practice at school may be a way to improve soft skills, including empathy, which,  
47  
48 in turn, can limit bullying (Beauchemin et al., 2008; Diamond, 2012; Flook et al., 2010; Jenkins  
49  
50 et al., 2018) and more generally reduce misbehavior. Implementing these interventions at a  
51  
52 young age is promising, given children's receptivity to cognitive training. Moreover, its  
53  
54 introduction at a young age may influence later professional success, social engagement, and  
55  
56 future well-being.  
57  
58  
59  
60

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

**CONFLICT OF INTEREST:** The authors have approved the manuscript and agreed with its submission. The authors declare no conflict of interest.

**DATA AVAILABILITY STATEMENT:** The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy or ethical restrictions

**ACKNOWLEDGMENTS:** The study was supported by a grant from the French National Research Agency (ANR-14-CE30-0014-01 APEX).

**ORCID :** Gabriela Rezende : [0000-0001-8677-4792](https://orcid.org/0000-0001-8677-4792)

Review Copy Only

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

## LIST OF FIGURE LEGENDS

- **Figure 1**

Overview of the study

- **Figure 2**

Inhibitory control efficiency in Children and Adolescents before and after interventions.

- **Figure 3.**

Changes in Cool and Hot Stroop tasks after Cognitive Training (CT) and Mindfulness Meditation practice (MM) in Children and Adolescents.

Review Copy Only

1  
2  
3 **REFERENCES**  
4  
5  
6  
7

- 8 Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in  
9 reading in school aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *145*, 157  
10 165. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.009>  
11  
12  
13  
14 Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Predominance of lateral over vertical mirror errors in  
15 reading : A case for neuronal recycling and inhibition. *Brain and Cognition*, *116*, 1 8.  
16  
17  
18 Aïte, A., Berthoz, A., Vidal, J., Roëll, M., Zaoui, M., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Taking a  
19 Third Person Perspective Requires Inhibitory Control : Evidence From a Developmental  
20 Negative Priming Study. *Child Development*, *87*(6). <https://doi.org/10.1111/cdev.12558>  
21  
22  
23  
24 Aïte, A., Cassotti, M., Linzarini, A., Osmont, A., Houdé, O., & Borst, G. (2018). Adolescents'  
25 inhibitory control : Keep it cool or lose control. *Developmental Science*, *21*(1), 12491.  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34 Algom, D., Chajut, E., & Lev, S. (2004). A Rational Look at the Emotional Stroop  
35 Phenomenon : A Generic Slowdown, Not a Stroop Effect. *Journal of Experimental*  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
Allan, N. P., & Lonigan, C. J. (2014). Exploring Dimensionality of Effortful Control Using Hot  
and Cool Tasks in a Sample of Preschool Children. *Journal of experimental child*  
*psychology*, *122*, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.11.013>  
  
Aydumne, Y., Introzzi, I., & Lipina, S. (2019). Inhibitory Processes Training for School-age  
Children : Transfer Effects. *Developmental Neuropsychology*, *44*(7), 513-542.  
<https://doi.org/10.1080/87565641.2019.1677667>  
  
Banich, M. T., Smolker, H. R., Snyder, H. R., Lewis-Peacock, J. A., Godinez, D. A., Wager, T.  
D., & Hankin, B. L. (2019). Turning down the heat : Neural mechanisms of cognitive

- 1  
2  
3 control for inhibiting task-irrelevant emotional information during adolescence.  
4  
5 *Neuropsychologia*, 125, 93-108. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.12.006>  
6  
7  
8 Beauchamp, K. G., Kahn, L. E., & Berkman, E. T. (2016). Does inhibitory control training  
9  
10 transfer? : Behavioral and neural effects on an untrained emotion regulation task. *Social*  
11  
12 *Cognitive and Affective Neuroscience*, 11(9), 1374-1382.  
13  
14 <https://doi.org/10.1093/scan/nsw061>  
15  
16  
17 Beauchamp, K. G., Shaffer, K. A., Fisher, P. A., & Berkman, E. T. (2019). Brief, computerized  
18  
19 inhibitory control training to leverage adolescent neural plasticity : A pilot effectiveness  
20  
21 trial. *Applied neuropsychology. Child*, 8(4), 366-382.  
22  
23 <https://doi.org/10.1080/21622965.2018.1495567>  
24  
25  
26 Beauchemin, J., Hutchins, T. L., & Patterson, F. (2008). Mindfulness meditation may lessen  
27  
28 anxiety, promote social skills, and improve academic performance among adolescents  
29  
30 with learning difficulties. *Complementary Health Practice Review*, 13, 34-45.  
31  
32  
33 Bhajiwala, M., Chevrier, A., & Schachar, R. (2014). Withholding and canceling a response in  
34  
35 ADHD adolescents. *Brain and Behavior*, 4(5), 602-614. <https://doi.org/10.1002/brb3.244>  
36  
37  
38 Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief  
39  
40 understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development*,  
41  
42 78(2), 647-663.  
43  
44  
45 Borst, G., Ahr, E., Roell, M., & Houdé, O. (2015). The cost of blocking the mirror  
46  
47 generalization process in reading : Evidence for the role of inhibitory control in  
48  
49 discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin &*  
50  
51 *Review*, 22(1), 228-234. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9>  
52  
53  
54 Borst, G., Aïte, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism  
55  
56 for typical cognitive development : Evidence from behavioural and brain-imaging  
57  
58  
59  
60



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

studies. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 57, 21-25.

<https://doi.org/10.1111/dmcn.12688>

Bouhours, L., Camarda, A., Ernst, M., Osmont, A., Borst, G., & Cassotti, M. (2021). How does social evaluation influence Hot and Cool inhibitory control in adolescence? *Plos one*, 16(9), 0257753. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257753>

Brault Foisy, L.-M. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics? *Trends in Neuroscience and Education*, 4, 26-36.

Brown, T. E., & Landgraf, J. M. (2010). Improvements in executive function correlate with enhanced performance and functioning and health-related quality of life : Evidence from 2 large, double-blind, randomized, placebo-controlled trials in ADHD. *Postgraduate Medicine*, 122(5), 42-51. <https://doi.org/10.3810/pgm.2010.09.2200>

Buschkuehl, M., Jaeggi, S. M., & Jonides, J. (2012). Neuronal effects following working memory training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.10.001>

Camarda, A., Salvia, E., Vidal, J., Poirel, N., Weil, B., Houdé, O., Borst, G., & Cassotti, M. (2018). Neural basis of functional fixedness during creative idea generation : An EEG study. *Neuropsychologia*, 118, 4-12.

Cardinale, E. M., Subar, A. R., Brotman, M. A., Leibenluft, E., Kircanski, K., & Pine, D. S. (2019). Inhibitory control and emotion dysregulation : A framework for research on anxiety. *Development and psychopathology*, 31(3), 859-869. <https://doi.org/10.1017/S0954579419000300>

Carlson, S. M., & Wang, T. S. (2007). Inhibitory control and emotion regulation in preschool children. *Cognitive Development*, 22(4), 489-510. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2007.08.002>

- 1  
2  
3 Casey, B. J., Jones, R. M., & Hare, T. A. (2008). The Adolescent Brain. *Annals of the New York*  
4  
5 *Academy of Sciences*, 1124, 111-126. <https://doi.org/10.1196/annals.1440.010>  
6  
7  
8 Casey, B. J., Somerville, L. H., Gotlib, I. H., Ayduk, O., Franklin, N. T., Askren, M. K., &  
9  
10 Shoda, Y. (2011). Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later.  
11  
12 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,  
13  
14 108(36), 14998-15003. <https://doi.org/10.1073/pnas.1108561108>  
15  
16  
17 Cassotti, M., Agogu e, M., Camarda, A., Houd e, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory Control as  
18  
19 a Core Process of Creative Problem Solving and Idea Generation from Childhood to  
20  
21 Adulthood : Inhibitory Control as a Core Process of Creative Problem Solving. *New*  
22  
23 *Directions for Child and Adolescent Development*, 2016(151), 61-72.  
24  
25 <https://doi.org/10.1002/cad.20153>  
26  
27  
28 Constantinidis, C., & Luna, B. (2019). Neural Substrates of Inhibitory Control Maturation in  
29  
30 Adolescence. *Trends in neurosciences*, 42(9), 604-616.  
31  
32 <https://doi.org/10.1016/j.tins.2019.07.004>  
33  
34  
35 Creswell, J. D. (2017). Mindfulness Interventions. *Annual Review of Psychology*, 68(1),  
36  
37 491-516. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-042716-051139>  
38  
39  
40 De Fano, A., Leshem, R., & Ben-Soussan, T. D. (2019). Creating an Internal Environment of  
41  
42 Cognitive and Psycho-Emotional Well-Being through an External Movement-Based  
43  
44 Environment : An Overview of Quadrato Motor Training. *International Journal of*  
45  
46 *Environmental Research and Public Health*, 16(12), E2160.  
47  
48 <https://doi.org/10.3390/ijerph16122160>  
49  
50  
51 De Neys, W., Raelison, M., Boissin, E., Voudouri, A., Bago, B., & Bialek, M. (2020). *MORAL*  
52  
53 *OUTRAGE AND SOCIAL DISTANCING : BAD OR BADLY INFORMED CITIZENS?*  
54  
55 [Preprint]. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/j9h76>  
56  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Diamond, A. (2012). Activities and Programs That Improve Children's Executive Functions.  
4  
5 *Current directions in psychological science*, 21(5), 335-341.  
6  
7 <https://doi.org/10.1177/0963721412453722>  
8  
9  
10 Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168.  
11  
12 <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>  
13  
14  
15 Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions Shown to Aid Executive Function Development  
16  
17 in Children 4 to 12 Years Old. *Science*, 333(6045), 959-964.  
18  
19 <https://doi.org/10.1126/science.1204529>  
20  
21  
22 Doll, J. J., Eslami, Z., & Walters, L. (2013). Understanding Why Students Drop Out of High  
23  
24 School, According to Their Own Reports : Are They Pushed or Pulled, or Do They Fall  
25  
26 Out? A Comparative Analysis of Seven Nationally Representative Studies. *SAGE Open*,  
27  
28 3(4), 2158244013503834. <https://doi.org/10.1177/2158244013503834>  
29  
30  
31 Draperi, M., Aïte, A., Cassotti, M., Le Stanc, L., Houdé, O., & Borst, G. (2022). Development  
32  
33 of cool and hot theory of mind and cool and hot inhibitory control abilities from 3.5 to  
34  
35 6.5 years of age. *PLoS ONE*, 17(1), 0262251.  
36  
37  
38 Dunning, D. L., Griffiths, K., Kuyken, W., Crane, C., Foulkes, L., Parker, J., & Dalgleish, T.  
39  
40 (2019). Research Review : The effects of mindfulness-based interventions on cognition  
41  
42 and mental health in children and adolescents – a meta-analysis of randomized controlled  
43  
44 trials. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(3), 244-258.  
45  
46 <https://doi.org/10.1111/jcpp.12980>  
47  
48  
49 Dunning, D., Tudor, K., Radley, L., Dalrymple, N., Funk, J., Vainre, M., Ford, T., Montero-  
50  
51 Marin, J., Kuyken, W., & Dalgleish, T. (2022). Do mindfulness-based programmes  
52  
53 improve the cognitive skills, behaviour and mental health of children and adolescents?  
54  
55 An updated meta-analysis of randomised controlled trials. *Evidence-Based Mental*  
56  
57 *Health*, 25(3), 135-142. <https://doi.org/10.1136/ebmental-2022-300464>  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Durston, S., Thomas, K. M., Yang, Y., Uluğ, A. M., Zimmerman, R. D., & Casey, B. J. (2002).  
4  
5 A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5(4),  
6  
7 9-16.  
8  
9  
10 Ernst, M., Pine, D. S., & Hardin, M. (2006). Triadic model of the neurobiology of motivated  
11  
12 behavior in adolescence. *Psychological Medicine*, 36(3), 299-312.  
13  
14 <https://doi.org/10.1017/S0033291705005891>  
15  
16  
17 Ethridge, L. E., Soilleux, M., Nakonezny, P. A., Reilly, J. L., Hill, S. K., Keefe, R. S., Gershon,  
18  
19 E. S., Pearlson, G. D., Tamminga, C. A., Keshavan, M. S., & Sweeney, J. A. (2014).  
20  
21 Behavioral response inhibition in psychotic disorders : Diagnostic specificity, familiarity  
22  
23 and relation to generalized cognitive deficit. *Schizophrenia Research*, 159(2-3), 491-498.  
24  
25 <https://doi.org/10.1016/j.schres.2014.08.025>  
26  
27  
28 Fan, Y., Tang, Y.-Y., Tang, R., & Posner, M. I. (2014). Short Term Integrative Meditation  
29  
30 Improves Resting Alpha Activity and Stroop Performance. *Applied Psychophysiology*  
31  
32 *and Biofeedback*, 39(3-4), 213-217. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9258-5>  
33  
34  
35 Faraji, M., Talepasand, S., & Boogar, I. R. (2019). Effectiveness of mindfulness-based  
36  
37 cognitive therapy for child on bullying behaviors among children. *International Archives*  
38  
39 *of Health Sciences*, 6(1), 52. [https://doi.org/10.4103/iahs.iahs\\_54\\_18](https://doi.org/10.4103/iahs.iahs_54_18)  
40  
41  
42 Fehlbauer, L. V., Raschle, N. M., Menks, W. M., Prätzlich, M., Flemming, E., Wyss, L., Euler,  
43  
44 F., Sheridan, M., Sterzer, P., & Stadler, C. (2018). Altered Neuronal Responses During  
45  
46 an Affective Stroop Task in Adolescents With Conduct Disorder. *Frontiers in*  
47  
48 *Psychology*, 9, 1961. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01961>  
49  
50  
51 Fernández García, L., Merchán, A., Phillips-Silver, J., & Daza González, M. T. (2021).  
52  
53 Neuropsychological Development of Cool and Hot Executive Functions Between 6 and  
54  
55 12 Years of Age : A Systematic Review. *Frontiers in Psychology*, 12, 687337.  
56  
57 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.687337>  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Flook, L., Smalley, S. L., Kitil, M. J., Galla, B. M., Kaiser-Greenland, S., Locke, J., & Kasari,  
4  
5 C. (2010). Effects of Mindful Awareness Practices on Executive Functions in Elementary  
6  
7 School Children. *Journal of Applied School Psychology*, 26(1).  
8  
9  
10 Fuhrmann, D., Knoll, L. J., & Blakemore, S.-J. (2015). Adolescence as a sensitive period of  
11  
12 brain development. *Trends in Cognitive Sciences*, 19, 558-566.  
13  
14 Galaverna, F. S., Morra, C. A., & Bueno, A. M. (2012). Attention in patients with chronic  
15  
16 schizophrenia: Deficit in inhibitory control and positive symptoms. *The European*  
17  
18 *Journal of Psychiatry*, 26(3), 185-195. [https://doi.org/10.4321/S0213-](https://doi.org/10.4321/S0213-61632012000300005)  
19  
20  
21 61632012000300005  
22  
23 Geier, C. F., & Luna, B. (2012). Developmental Effects of Incentives on Response Inhibition.  
24  
25 *Child Development*, 83(4), 1262-1274. [https://doi.org/10.1111/j.1467-](https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01771.x)  
26  
27 8624.2012.01771.x  
28  
29 Geier, C. F., Terwilliger, R., Teslovich, T., Velanova, K., & Luna, B. (2010). Immaturities in  
30  
31 reward processing and its influence on inhibitory control in adolescence. *Cerebral*  
32  
33 *Cortex*, 20(7), 1613-1629. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp225>  
34  
35  
36 Geronimi, E. M. C., Arellano, B., & Woodruff-Borden, J. (2020). Relating mindfulness and  
37  
38 executive function in children. *Clinical Child Psychology and Psychiatry*, 25(2), 435-445.  
39  
40  
41 <https://doi.org/10.1177/1359104519833737>  
42  
43  
44 Geurts, H. M., Bergh, S. F. W. M., & Ruzzano, L. (2014). Prepotent response inhibition and  
45  
46 interference control in autism spectrum disorders: Two meta-analyses. *Autism Research*,  
47  
48 7, 407-420.  
49  
50 Geurts, H. M., Oord, S., & Crone, E. A. (2006). Hot and cool aspects of cognitive control in  
51  
52 children with ADHD: Decision-making and inhibition. *Journal of Abnormal Child*  
53  
54 *Psychology*, 34, 813-824.  
55  
56  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Goeleven, E., De Raedt, R., Baert, S., & Koster, E. H. W. (2006). Deficient inhibition of  
4  
5 emotional information in depression. *Journal of Affective Disorders*, *93*(1-3), 149-157.  
6  
7 <https://doi.org/10.1016/j.jad.2006.03.007>  
8  
9  
10 Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Exercising your brain : A review of human brain plasticity  
11  
12 and training-induced learning. *Psychology and Aging*, *23*(4), 692-701.  
13  
14 <https://doi.org/10.1037/a0014345>  
15  
16  
17 Holas, P., & Jankowski, T. (2013). A cognitive perspective on mindfulness. *International*  
18  
19 *Journal of Psychology*, *48*(3), 232-243. <https://doi.org/10.1080/00207594.2012.658056>  
20  
21  
22 Holmboe, K., Larkman, C., de Klerk, C., Simpson, A., Bell, M. A., Patton, L., Christodoulou,  
23  
24 C., & Dvergsdal, H. (2021). The early childhood inhibitory touchscreen task : A new  
25  
26 measure of response inhibition in toddlerhood and across the lifespan. *PloS One*, *16*(12),  
27  
28 e0260695. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260695>  
29  
30  
31 Hölzel, B. K., Lazar, S. W., Gard, T., Schuman-Olivier, Z., Vago, D. R., & Ott, U. (2011). How  
32  
33 Does Mindfulness Meditation Work? Proposing Mechanisms of Action From a  
34  
35 Conceptual and Neural Perspective. *Perspectives on Psychological Science*, *6*(6),  
36  
37 537-559. <https://doi.org/10.1177/1745691611419671>  
38  
39  
40 Hongwanishkul, D., Happaney, K. R., Lee, W. S. C., & Zelazo, P. D. (2005). Assessment of  
41  
42 hot and cool executive function in young children : Age-related changes and individual  
43  
44 differences. *Developmental Neuropsychology*, *28*(2), 617-644.  
45  
46 [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802\\_4](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_4)  
47  
48  
49 Houdé, O. (2014). *Le raisonnement*. Presses universitaires de France.  
50  
51  
52 Jenkins, L. N., Tennant, J. E., & Demaray, M. K. (2018). Executive functioning and bullying  
53  
54 participant roles : Differences for boys and girls. *Journal of School Violence*, *17*(4),  
55  
56 521-537. <https://doi.org/10.1080/15388220.2018.1453822>  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Kang, Y., Rahrig, H., Eichel, K., Niles, H. F., Rocha, T., Lepp, N. E., Gold, J., & Britton, W.  
4  
5 B. (2018). Gender differences in response to a school-based mindfulness training  
6  
7 intervention for early adolescents. *Journal of School Psychology, 68*, 163-176.  
8  
9 <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2018.03.004>  
10  
11  
12 Karbach, J. (2008). *Potential and limits of executive control training : Age differences in the*  
13  
14 *near and far transfer of task-switching training.*  
15  
16  
17 Karbach, J. (2016). *Cognitive Training: An Overview of Features and Applications.*  
18  
19 [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42662-4_1)  
20  
21  
22 Karbach, J., Könen, T., & Spengler, M. (2017). Who Benefits the Most ? Individual Differences  
23  
24 in the Transfer of Executive Control Training Across the Lifespan. *Journal of Cognitive*  
25  
26 *Enhancement, 1*(4), 394-405. <https://doi.org/10.1007/s41465-017-0054-z>  
27  
28  
29 Karbach, J., & Kray, J. (2009). How useful is executive control training ? Age differences in  
30  
31 near and far transfer of task-switching training : Transfer of task-switching training.  
32  
33 *Developmental Science, 12*(6), 978-990. [https://doi.org/10.1111/j.1467-](https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00846.x)  
34  
35 [7687.2009.00846.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00846.x)  
36  
37  
38 Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to  
39  
40 adolescence. *Frontiers in Psychology, 5*, 390. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00390>  
41  
42  
43 Killingsworth, M. A., & Gilbert, D. T. (2010). A wandering mind is an unhappy mind. *Science*  
44  
45 *(New York, N.Y.), 330*(6006), 932. <https://doi.org/10.1126/science.1192439>  
46  
47  
48 Kim, S., Nordling, J. K., Yoon, J. E., Boldt, L. J., & Kochanska, G. (2013). Effortful Control  
49  
50 in “Hot” and “Cool” Tasks Differentially Predicts Children’s Behavior Problems and  
51  
52 Academic Performance. *Journal of Abnormal Child Psychology, 41*(1), 43-56.  
53  
54 <https://doi.org/10.1007/s10802-012-9661-4>  
55  
56  
57 Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences,*  
58  
59 *14*(7), 317-324. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.05.002>  
60

- 1  
2  
3 Koncz, A., Köteles, F., Demetrovics, Z., & Takacs, Z. K. (2021). Benefits of a Mindfulness-  
4 Based Intervention upon School Entry: A Pilot Study. *International Journal of*  
5 *Environmental Research and Public Health*, *18*(23), Art. 23.  
6  
7 <https://doi.org/10.3390/ijerph182312630>  
8  
9  
10  
11  
12 Kuroda, Y., Yamakawa, O., & Ito, M. (2022). Benefits of mindfulness in academic settings :  
13 Trait mindfulness has incremental validity over motivational factors in predicting  
14 academic affect, cognition, and behavior. *BMC Psychology*, *10*, 48.  
15  
16 <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00746-3>  
17  
18  
19  
20  
21 Kuyken, W., Ball, S., Crane, C., Ganguli, P., Jones, B., Montero-Marin, J., Nuthall, E., Raja,  
22 A., Taylor, L., Tudor, K., Viner, R. M., Allwood, M., Aukland, L., Dunning, D., Casey,  
23 T., Dalrymple, N., Wilde, K. D., Farley, E.-R., Harper, J., ... Williams, J. M. G. (2022).  
24 Effectiveness and cost-effectiveness of universal school-based mindfulness training  
25 compared with normal school provision in reducing risk of mental health problems and  
26 promoting well-being in adolescence : The MYRIAD cluster randomised controlled trial.  
27 *Evidence-Based Mental Health*, *25*(3), 99-109. [https://doi.org/10.1136/ebmental-2021-](https://doi.org/10.1136/ebmental-2021-300396)  
28 [300396](https://doi.org/10.1136/ebmental-2021-300396)  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40 Lamothe, M., Rondeau, É., Malboeuf-Hurtubise, C., Duval, M., & Sultan, S. (2016). Outcomes  
41 of MBSR or MBSR-based interventions in health care providers : A systematic review  
42 with a focus on empathy and emotional competencies. *Complementary Therapies in*  
43 *Medicine*, *24*, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2015.11.001>  
44  
45  
46  
47  
48  
49 Laneri, D., Krach, S., Paulus, F. M., Kanske, P., Schuster, V., Sommer, J., & Müller-Pinzler,  
50 L. (2017). Mindfulness meditation regulates anterior insula activity during empathy for  
51 social pain. *Human Brain Mapping*, *38*(8), 4034-4046.  
52  
53 <https://doi.org/10.1002/hbm.23646>  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60



- 1  
2  
3 Leshem, R., De Fano, A., & Ben-Soussan, T. D. (2020). The Implications of Motor and  
4  
5 Cognitive Inhibition for Hot and Cool Executive Functions : The Case of Quadrato Motor  
6  
7 Training. *Frontiers in Psychology*, *11*, 940. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00940>  
8  
9  
10 Liu, X., Xiao, R., & Tang, W. (2021). The Impact of School-Based Mindfulness Intervention  
11  
12 on Bullying Behaviors Among Teenagers : Mediating Effect of Self-Control. *Journal of*  
13  
14 *Interpersonal Violence*, 8862605211052047.  
15  
16 <https://doi.org/10.1177/08862605211052047>  
17  
18  
19 Luciana, M., & Collins, P. F. (2012). Incentive Motivation, Cognitive Control, and the  
20  
21 Adolescent Brain : Is It Time for a Paradigm Shift? *Child development perspectives*, *6*(4),  
22  
23 392-399. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2012.00252.x>  
24  
25  
26 Luna, B. (2009). Developmental changes in cognitive control through adolescence. *Advances*  
27  
28 *in Child Development and Behavior*, *37*, 233-278.  
29  
30  
31 Luna, B., & Wright, C. (2016). Adolescent brain development : Implications for the juvenile  
32  
33 criminal justice system. In *APA handbook of psychology and juvenile justice* (p. 91-116).  
34  
35 American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/14643-005>  
36  
37  
38 Marcovitch, S., O'Brien, M., Calkins, S. D., Leerkes, E. M., Weaver, J. M., & Levine, D. W.  
39  
40 (2015). A longitudinal assessment of the relation between executive function and theory  
41  
42 of mind at 3, 4, and 5 years. *Cognitive Development*, *33*, 40-55.  
43  
44 <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2014.07.001>  
45  
46  
47 Metcalfe, J., & Mischel, W. (1999). A hot/cool-system analysis of delay of gratification :  
48  
49 Dynamics of willpower. *Psychological Review*, *106*(1), 3-19.  
50  
51 <https://doi.org/10.1037/0033-295x.106.1.3>  
52  
53  
54 Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., & others.  
55  
56 (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety.  
57  
58 *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(7), 2693-2698.  
59  
60

- 1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60
- Montero-Marin, J., Allwood, M., Ball, S., Crane, C., Wilde, K. D., Hinze, V., Jones, B., Lord, L., Nuthall, E., Raja, A., Taylor, L., Tudor, K., Team, M., Blakemore, S.-J., Byford, S., Dalglish, T., Ford, T., Greenberg, M. T., Ukoumunne, O. C., ... Kuyken, W. (2022). School-based mindfulness training in early adolescence : What works, for whom and how in the MYRIAD trial? *Evidence-Based Mental Health*, 25(3), 117-124. <https://doi.org/10.1136/ebmental-2022-300439>
- Nigg, J. T. (2017). Annual research review : On the relations among self-regulation, self-control, executive functioning, effortful control, cognitive control, impulsivity, risk-taking, and inhibition for developmental psychopathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 58, 361-383.
- Oberle, E., Schonert-Reichl, K. A., Lawlor, M. S., & Thomson, K. C. (2012). Mindfulness and Inhibitory Control in Early Adolescence. *The Journal of Early Adolescence*, 32(4), 565-588. <https://doi.org/10.1177/0272431611403741>
- Osmont, A., Cassotti, M., Agogu e, M., Houd e, O., & Moutier, S. (2014). Does ambiguity aversion influence the framing effect during decision making? *Psychonomic Bulletin & Review*, 22, 572-577.
- O'Toole (nee Poland), S., Monks, C., & Tsermentseli, S. (2017). Associations between and development of cool and hot executive functions across early childhood. *British Journal of Developmental Psychology*, 36. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12226>
- O'Toole, S., Monks, C. P., & Tsermentseli, S. (2018). Associations between and development of cool and hot executive functions across early childhood. *The British Journal of Developmental Psychology*, 36(1), 142-148. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12226>
- Padmanabhan, A., Garver, K., O'Hearn, K., Nawarawong, N., Liu, R., Minshew, N. L., & B. (2015). Developmental changes in brain function underlying inhibitory control in autism spectrum disorders. *Autism Research*, 8, 123-135.

- 1  
2  
3 Prencipe, A., Kesek, A., Cohen, J., Lamm, C., Lewis, M. D., & Zelazo, P. D. (2011).  
4  
5 Development of hot and cool executive function during the transition to adolescence.  
6  
7 *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(3), 621-637.  
8  
9 <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.008>  
10  
11  
12 Roell, M., Viarouge, A., Hilscher, E., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for a  
13  
14 visuospatial bias in decimal number comparison in adolescents and in adults. *Scientific*  
15  
16 *Reports*, *9*(1), 1-9.  
17  
18  
19 Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Inhibitory control and decimal number  
20  
21 comparison in school-aged children. *PloS One*, *12*(11), 0188276.  
22  
23  
24 Ron-Grajales, A., Sanz-Martin, A., Castañeda-Torres, R. D., Esparza-López, M., Ramos-Loyo,  
25  
26 J., & Inozemtseva, O. (2021). Effect of Mindfulness Training on Inhibitory Control in  
27  
28 Young Offenders. *Mindfulness*, *12*(7), 1822-1838. [https://doi.org/10.1007/s12671-021-](https://doi.org/10.1007/s12671-021-01643-3)  
29  
30 [01643-3](https://doi.org/10.1007/s12671-021-01643-3)  
31  
32  
33 Rosenberg, E. L., Zanesco, A. P., King, B. G., Aichele, S. R., Jacobs, T. L., Bridwell, D. A.,  
34  
35 MacLean, K. A., Shaver, P. R., Ferrer, E., Sahdra, B. K., Lavy, S., Wallace, B. A., &  
36  
37 Saron, C. D. (2015). Intensive meditation training influences emotional responses to  
38  
39 suffering. *Emotion (Washington, D.C.)*, *15*(6), 775-790.  
40  
41 <https://doi.org/10.1037/emo0000080>  
42  
43  
44 Rubia, K., Russell, T., Overmeyer, S., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., Sharma, T., & Taylor,  
45  
46 E. (2001). Mapping motor inhibition: Conjunctive brain activations across different  
47  
48 versions of go/no-go and stop tasks. *NeuroImage*, *13*(2), 250-261.  
49  
50 <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0685>  
51  
52  
53 Rubia, K., Smith, A. B., Taylor, E., & Brammer, M. (2007). Linear age-correlated functional  
54  
55 development of right inferior fronto-striato-cerebellar networks during response  
56  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 inhibition and anterior cingulate during error-related processes. *Human Brain Mapping*,  
4  
5 28(11), 1163-1177.  
6  
7  
8 Rueda, M. R., Rothbart, M. K., McCandliss, B. D., Saccomanno, L., & Posner, M. I. (2005).  
9  
10 Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention.  
11  
12 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,  
13  
14 102(41), 14931-14936.  
15  
16  
17 Schonert-Reichl, K. A., Oberle, E., Lawlor, M. S., Abbott, D., Thomson, K., Oberlander, T. F.,  
18  
19 & Diamond, A. (2015). Enhancing cognitive and social-emotional development through  
20  
21 a simple-to-administer mindfulness-based school program for elementary school  
22  
23 children: A randomized controlled trial. *Developmental Psychology*, 51(1), 52-66.  
24  
25  
26 <https://doi.org/10.1037/a0038454>  
27  
28  
29 Schonert-Reichl, K., & Lawlor, M. (2010). The Effects of a Mindfulness-Based Education  
30  
31 Program on Pre- and Early Adolescents' Well-Being and Social and Emotional  
32  
33 Competence. *Mindfulness*, 1, 137-151. <https://doi.org/10.1007/s12671-010-0011-8>  
34  
35  
36 Sleilaty, J. (2022). The Impact of a Regular Mindfulness Practice on Teachers: A Critical  
37  
38 Review. *Emerging Perspectives: Interdisciplinary Graduate Research in Education and*  
39  
40 *Psychology*, 6(1), Art. 1.  
41  
42  
43 Smolker, H. R., Wang, K., Luciana, M., Bjork, J. M., Gonzalez, R., Barch, D. M., McGlade, E.  
44  
45 C., Kaiser, R. H., Friedman, N. P., Hewitt, J. K., & Banich, M. T. (2022). The Emotional  
46  
47 Word-Emotional Face Stroop task in the ABCD study: Psychometric validation and  
48  
49 associations with measures of cognition and psychopathology. *Developmental Cognitive*  
50  
51 *Neuroscience*, 53, 101054. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.101054>  
52  
53  
54 Steinberg, L. (2008). A Social Neuroscience Perspective on Adolescent Risk-Taking.  
55  
56 *Developmental review: DR*, 28(1), 78-106. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.08.002>  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 Steinberg, L. (2010). A dual systems model of adolescent risk-taking. *Developmental*  
4  
5 *Psychobiology*, 52(3), 216-224. <https://doi.org/10.1002/dev.20445>  
6  
7  
8 Takacs, Z. K., & Kassai, R. (2019). The efficacy of different interventions to foster children's  
9  
10 executive function skills : A series of meta-analyses. *Psychological Bulletin*, 145(7),  
11  
12 653-697. <https://doi.org/10.1037/bul0000195>  
13  
14  
15 Tang, Y.-Y. (2017). *Traits and States in Mindfulness Meditation* (p. 29-34).  
16  
17 [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46322-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46322-3_4)  
18  
19 Tang, Y.-Y., Hölzel, B. K., & Posner, M. I. (2015). The neuroscience of mindfulness  
20  
21 meditation. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 213-225.  
22  
23 <https://doi.org/10.1038/nrn3916>  
24  
25  
26 Thompson, G. J. (2018). Neural and metabolic basis of dynamic resting state fMRI.  
27  
28 *NeuroImage*, 180, 448-462. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.09.010>  
29  
30  
31 Tottenham, N., Tanaka, J. W., Leon, A. C., McCarry, T., Nurse, M., Hare, T. A. N., & C. (2009).  
32  
33 The NimStim set of facial expressions : Judgments from untrained research participants.  
34  
35 *Psychiatry Research*, 168, 242-249.  
36  
37  
38 Traverso, L., Viterbori, P., & Usai, M. C. (2015). Improving executive function in childhood :  
39  
40 Evaluation of a training intervention for 5-year-old children. *Frontiers in Psychology*, 6,  
41  
42 525. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00525>  
43  
44  
45 Tsermentseli, S., & Poland, S. (2016). *Cool versus hot executive function : A new approach to*  
46  
47 *executive function*. 4.  
48  
49 Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for the role of inhibition in numerical  
50  
51 comparison : A negative priming study in 7-to 8-year-olds and adults. *Journal of*  
52  
53 *Experimental Child Psychology*, 186, 131-141.  
54  
55  
56 Wilkinson, H. R., Smid, C., Morris, S., Farran, E. K., Dumontheil, I., Mayer, S., Tolmie, A.,  
57  
58 Bell, D., Porayska-Pomsta, K., Holmes, W., Mareschal, D., Thomas, M. S. C., &  
59  
60

1  
2  
3 UnLocke Team. (2020). Domain-Specific Inhibitory Control Training to Improve  
4 Children's Learning of Counterintuitive Concepts in Mathematics and Science. *Journal*  
5 *of Cognitive Enhancement: Towards the Integration of Theory and Practice*, 4(3),  
6 296-314. <https://doi.org/10.1007/s41465-019-00161-4>  
7  
8  
9  
10  
11

12 Wisner, B. L. (2014). An Exploratory Study of Mindfulness Meditation for Alternative School  
13 Students : Perceived Benefits for Improving School Climate and Student Functioning.  
14 *Mindfulness*, 5(6), 626-638. <https://doi.org/10.1007/s12671-013-0215-9>  
15  
16  
17  
18

19 Zelazo, P. D., & Carlson, S. M. (2012). *Hot and Cool Executive Function in Childhood and*  
20 *Adolescence : Development and Plasticity*. <https://doi.org/10.1111/j.1750->  
21 [8606.2012.00246.x](https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2012.00246.x)  
22  
23  
24  
25

26 Zelazo, P. D., & Cunningham, W. A. (2007). Executive Function : Mechanisms Underlying  
27 Emotion Regulation. In *Handbook of emotion regulation* (p. 135-158). The Guilford  
28 Press.  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

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

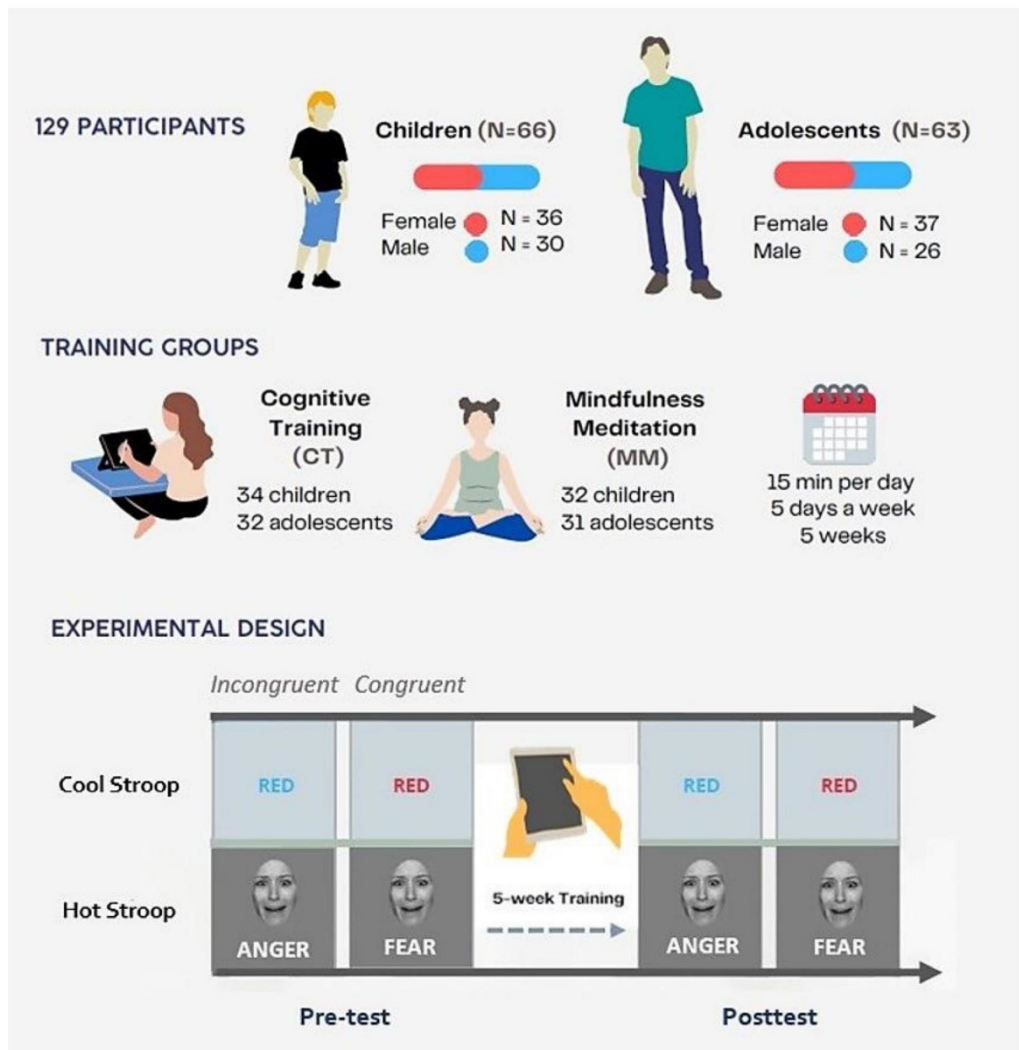
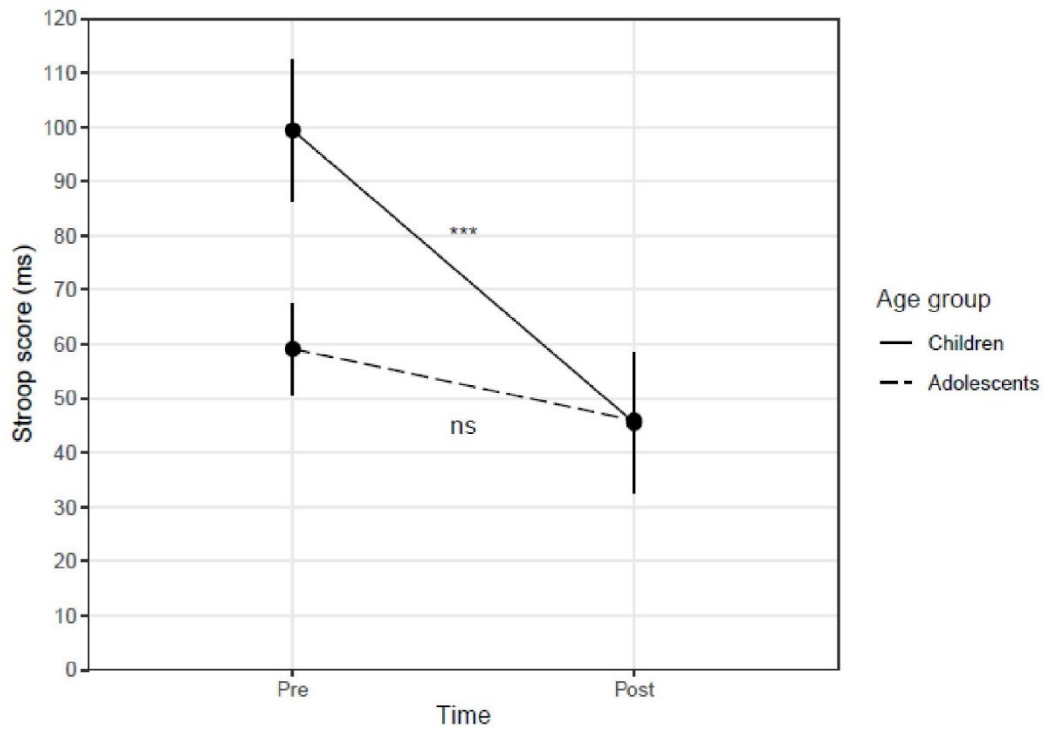
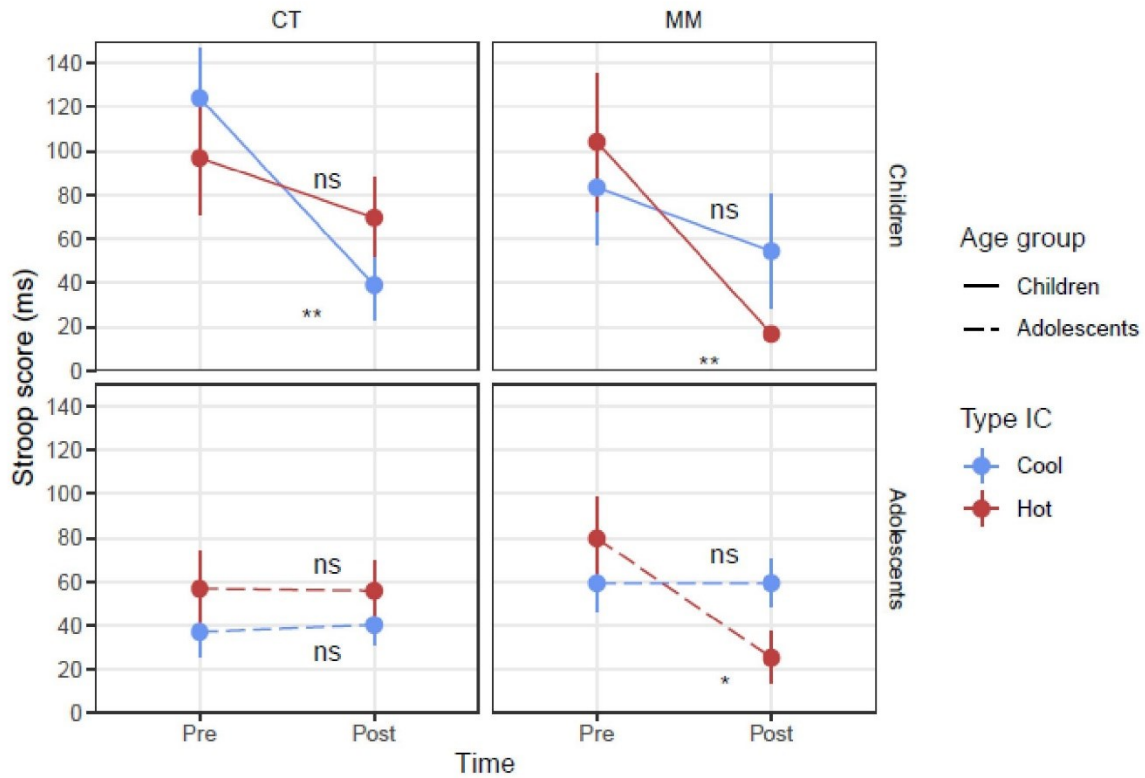


Figure 1. Overview of the study.



**Figure 2. Inhibitory control efficiency in Children and Adolescents before and after interventions.** Data represents the average Stroop score (difference between RTs in congruent and incongruent conditions) in milliseconds in Children (solid line) and Adolescents (dashed line) across Types of conflict (Cool Stroop task and Hot Stroop Task) and Intervention groups (Cognitive Training and Mindfulness Meditation practice). Error bars denote the standard error to the mean (s.e.m.). ns:  $p > 0.05$ ; \*\*\*:  $p < 0.001$ .

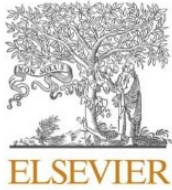




**Figure 3. Changes in Cool and Hot Stroop tasks after Cognitive Training (CT) and Mindfulness Meditation practice (MM) in Children and Adolescents.** Data represents the average Stroop score (difference between RTs in congruent and incongruent conditions) in millisecond in Cool (blue) and Hot (red) Stroop tasks in Children (solid line) and Adolescents (dashed line). Error bars denote the standard error to the mean (s.e.m.). ns :  $p > 0.05$ ; \* :  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p_{FDR} < 0.01$ .

IC Training group						
	Cool Stroop			Hot Stroop		
	Pre	Post	Statistics	Pre	Post	Statistics
Children						
Interference score	124.26 ± 22.69	39.07 ± 15.67	-85.04±27.3, z=-3.11, p<.01	96.92 ± 26.07	69.7 ± 17.89	-26.58±27.73, z=-0.96, p=0.33
RT congruent	914 ± 31	811 ± 34	-104.68±30.67, z=-3.41, p<.001	1175 ± 45	1054 ± 52	-117.61±31.19, z=-3.77, p<.001
RT incongruent	1039 ± 39	850 ± 34	-189.4±39.98, z=-4.74, p<.001	1272 ± 51	1123 ± 58	-142.31±40.66, z=-3.5, p<.001
Adolescents						
Interference score	37.09 ± 11.15	40.3 ± 9.1	2.38±29.97, z=0.08, p=0.93	56.85 ± 16.89	55.89 ± 13.27	-2.61±29.19, z=-0.09, p=0.92
RT congruent	568 ± 21	482 ± 16	-98.87±33.95, z=-2.91, p<.01	669 ± 24	631 ± 27	-51.86±32.99, z=-1.57, p=0.11
RT incongruent	605 ± 27	522 ± 21	-99.53±44.21, z=-2.25, p<.05	725 ± 32	687 ± 28	-61.19±42.97, z=-1.42, p=0.15
MM Training group						
	Cool Stroop			Hot Stroop		
	Pre	Post	Statistics	Pre	Post	Statistics
Children						
Interference score	83.39 ± 25.65	54.34 ± 26.15	-28.36±28.7, z=-0.99, p=0.32	104.19 ± 31.22	16.7 ± 30.42	-88.99±29.42, z=-3.02, p<.01
RT congruent	928 ± 36	890 ± 36	-30.07±32.14, z=-0.94, p=0.34	1190 ± 57	1093 ± 54	-69.19±33.26, z=-2.08, p<.05
RT incongruent	1011 ± 42	944 ± 49	-57.83±41.91, z=-1.38, p=0.16	1294 ± 65	1110 ± 54	-167.5±43.33, z=-3.87, p<.001
Adolescents						
Interference score	59.31 ± 12.6	59.38 ± 10.91	0.38±27.94, z=0.01, p=0.98	79.8 ± 18.78	25.37 ± 11.94	-53.66±28.11, z=-1.91, p=0.05
RT congruent	611 ± 22	536 ± 21	-70.1±31.11, z=-2.25, p<.05	707 ± 26	657 ± 28	-59.28±31.39, z=-1.89, p=0.05
RT incongruent	670 ± 29	595 ± 27	-69.05±40.61, z=-1.7, p=0.08	787 ± 40	682 ± 29	-109.42±40.96, z=-2.67, p<.01

**Table 1. Response Times (RTs) for the cool and hot Stroop tasks before and after Cognitive Training and Mindfulness Meditation practice in Children and Adolescents.** Data are reported as Mean ± Standard Error to the Mean (s.e.m) in milliseconds. The same mixed-effect model (see details in Method section) was applied to RTs in the Congruent and Incongruent conditions along with the Stroop Score to assess the Post vs Pre changes. Raw p-values are reported, with no correction for multiple testing.

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## Cognitive Development

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/cogdev](http://www.elsevier.com/locate/cogdev)

## Inhibitory control training on executive functions of children and adolescents: A latent change score model approach

Iris Menu<sup>a</sup>, Gabriela Rezende<sup>a</sup>, Lorna Le Stanc<sup>a</sup>, Grégoire Borst<sup>a,b,1</sup>,  
Arnaud Cachia<sup>a,c,\*</sup>

<sup>a</sup> Université Paris Cité, LaPsyDÉ, CNRS, F-75005 Paris, France

<sup>b</sup> Institut Universitaire de France, Paris, France

<sup>c</sup> Université Paris Cité, Imaging biomarkers for brain development and disorders, UMR INSERM 1266, GHU Paris Psychiatrie & Neurosciences, F-75005 Paris, France

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Executive functions  
Transfer  
Inhibitory control  
Training  
Latent change score  
Development

### ABSTRACT

Executive functions (EFs), including inhibitory control (IC), updating, and switching, are important for academic achievement, physical and mental health. Several cognitive training programs have tested the possibility of improving EFs and have reported variable findings, particularly for transfer effects. This study aimed to evaluate the effects of a 5 weeks computerized IC-training on trained and nontrained EFs in children and adolescents by using latent change score (LCS) models and repeated-measures ANOVAs. In children, although ANOVAs only detected training-related changes in IC, LCS also detected far transfer effect in updating. In adolescents, LCS (but not ANOVAs) revealed significant changes in IC following training. Of note, LCS also revealed that (1) children and adolescents with lower initial EF abilities progress more than those with higher initial abilities and (2) changes in updating and switching depend on initial levels in each of these EFs but also on initial levels in the other EFs.

*Data Availability Statement:* The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

### 1. Introduction

Executive functions (EFs) are a set of high-level cognitive functions that allow an individual to intentionally regulate his or her thinking and acts in order to achieve goals (Miyake et al., 2000). The following three EFs are commonly distinguished: inhibitory control (IC), working memory updating and switching or mental flexibility (Diamond, 2013). These functions are important for academic achievement (Duncan et al., 2007) and necessary for the development of more complex skills, such as reasoning (Richland & Burchinal, 2013), theory of mind (Benson et al., 2013; Marcovitch et al., 2015; Sabbagh et al., 2006), arithmetic (Cragg et al., 2017; Gilmore & Cragg, 2018; Chap. 14; Lee et al., 2018), decision-making (Xu et al., 2020) or creativity (Cassotti et al., 2016; Kleibeuker et al., 2013). EFs are also related to physical and mental health (Barch, 2005; Demetriou et al., 2018; Dickson et al., 2017; Miller et al., 2011; Yeo et al., 2021). Thus, as stated by Adele Diamond “Executive functions are important to just about every aspect of life” (Diamond,

\* Correspondence to: Laboratory for the Psychology of Child Development and Education, CNRS UMR 8240, Sorbonne, 46 rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France.

E-mail address: [arnaud.cachia@u-paris.fr](mailto:arnaud.cachia@u-paris.fr) (A. Cachia).

<sup>1</sup> Authors contributed equally.

<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2022.101231>

Received 30 December 2021; Received in revised form 7 June 2022; Accepted 3 August 2022

Available online 23 August 2022

0885-2014/© 2022 Elsevier Inc. All rights reserved.

2013, pp. 137). Furthermore, these EF abilities improve with age (Bjorklund & Harnishfeger, 1995; Casey et al., 1997; Lee et al., 2013; Luna et al., 2004; Paulsen et al., 2015; Rubia et al., 2013; Tamm et al., 2002) under strong genetic and environmental influences (Diamond, 2011; Friedman et al., 2008, 2016; Fujisawa et al., 2017; Pan et al., 2018; Zhang et al., 2018).

Studies of individual differences in EFs indicate that performance on tasks that are designed to tap a specific EF domain (e.g., IC) is correlated with (but also separate from) performance on tasks that tap other EF domains (e.g., switching; Hartung et al., 2020). In addition, factor analyses reveal the presence of multiple distinct factors in scores derived from batteries of EF tests. Hence, EFs unlikely refer to a single, undifferentiated cognitive process. By using structural equation modeling (SEM) with latent factors, Miyake et al. (2000) proposed a hierarchical structure of EFs, and the three latent factors of the model were found to correspond to each EF domain. These latent factors are able to be differentiated (EF diversity), although they share a significant proportion of their variances (EF unity, or common-EF ability; Friedman et al., 2011). This model was followed by a new, nested, model (Miyake & Friedman, 2012) with a common factor (common EF) and two specific factors (updating- and shifting-specific). This second model raises the issue of the specific role of the IC, whose tasks only participates in the definition of the common EF but which is not specifically mentioned in this model. A recent review shows that both models are equivalently, the three-factor models being largely used among school-aged children adolescents and adults and the nested factor models among adolescents and adults (Karr et al., 2018).

Due to the fact that EFs are implicated in learning, academic achievement, psychiatric health and everyday functioning (Best et al., 2011; Diamond, 2013), several intervention programs have tested the possibility of improving various aspects of EF (for reviews, see Jolles & Crone, 2012; Karbach & Unger, 2014; Spierer et al., 2013). A recent meta-analysis suggested that training a single EF has nonsystematic effects on the improvement of untrained EF (i.e., Kassai et al., 2019). For instance, some studies in which one EF is trained have reported no effects of the training (Enge, Behnke et al., 2014; Talanow & Ettinger, 2018; Thorell et al., 2009), or only near transfer, i.e., improvement on the same EF (Bergman Nutley et al., 2011; Dunning et al., 2013; Zhao et al., 2015) or far transfer, i.e., abilities that are not targeted by the intervention (Aydumne et al., 2019; Beauchamp, Kahn, & Berkman, 2016; Jaeggi et al., 2011; Liu et al., 2015; Maraver et al., 2016; Söderqvist & Bergman Nutley, 2015). Interestingly, studies in which all of the EFs were trained have reported near transfer to specific EFs, including updating (Blakey & Carroll, 2015) and IC (Dowsett & Livesey, 2000) as well as far transfer effects on school abilities (Blakey & Carroll, 2015; Traverso et al., 2019).

Many of these studies have focused on IC because of its importance for cognitive and socioemotional development (for a review see Borst et al., 2015), academic success (e.g., Kim et al., 2013) and its impairment in many psychiatric disorders (e.g., Ajilchi & Nejadi, 2017; Craig et al., 2016; Demetriou et al., 2019). IC is a multidimensional construct that can be divided in response inhibition and interference control (Diamond, 2013). IC training can target any of these dimensions and can affect them differently. For instance, IC training based on a playground activity (e.g., 'Wesley says') was found to improve preschool children performance in a Go/NoGo task (i.e., response inhibition) but not in a Stroop task (i.e., interference control) (Zhao et al., 2015). Such findings suggest that it may be preferable to train both facets of the IC to ensure near transfer effects. This IC dimension specific effect is not systematic. For instance, IC training composed of Simon and emotional Go/NoGo tasks (i.e., response inhibition) was found to transfer to interference control in an untrained Flanker task in adults (Millner et al., 2012).

Analyzing the extent to which training benefits other cognitive abilities, the extent to which it transfers to other domains, is crucial in order to evaluate the overall benefits of training. This is especially true for EFs, which are known to be important for many abilities. If a training targeting an EF allows to improve this EF (near transfer) but also the other EFs (far transfer), it is the whole EF core that is improved which can potentially impact many other abilities. The implications of such a transfer mechanism are therefore considerable. Moreover, studying transfer in the case of executive training could provide information at the theoretical level on the structural organization of EFs. For instance, the existence of near transfer, but not far transfer, could support the notion that training only impacts the specific part of the trained EF, which would therefore provide evidence of a factorial organization of EFs. On the contrary, the existence of a far transfer could support that training likely acts on the common part of EFs, which would thus be evidence for the unity of EFs.

The discrepancies in the near and far transfer effects following EF-, IC- or brain-training in general (Simons et al., 2016) that have been reported in the literature may be explained by the fact that transfer effects vary with training time (Jaeggi et al., 2008) and individual differences in training receptivity (Jaeggi et al., 2011; Jaeggi et al., 2014). Of note, many studies have reported that individuals can respond differently to the same training intervention depending on their baseline level. Two (opposite) prominent mechanisms have been proposed to describe and explain such baseline effect (Karbach & Unger, 2014). The 'compensation' effect states that individuals with high baseline abilities benefit the least from cognitive training because they are already functioning at an optimal level, which indicates that they have less room to improve, in contrast to individuals with lower baseline abilities. The 'magnification' effects (also referred as Matthew, or scissor, effect) states that individuals that are already performing very well will also benefit the most from cognitive interventions, because high-performing participants have more efficient cognitive resources to acquire and implement new abilities. In case of magnification, baseline cognitive performance positively correlates with training gains while in case of compensation, baseline cognitive performance negatively correlates with training gains. Finally, the transfer effect depends on the statistical approach that is used to assess the potential transfer effect (Noack, Lövdén, & Schmiedek, 2014). Training studies typically use analysis of variance (ANOVA) or linear models to assess near and far transfer effects. These statistical approaches are intrinsically limited by the following three main issues: (1) dissociating the change in trained cognitive function from the change in untrained functions; (2) simultaneously and explicitly testing an entire set of possibly correlated variables; and (3) taking into account the complex error structure of longitudinal data (Noack et al., 2014). In the context of EF training, the unity and diversity of EFs also raise specific statistical issues, due to the fact that the changes of one EF (e.g., IC) are not entirely independent of the changes of the other EF (e.g., updating and switching).

The cross-lagged panel model (CLPM; e.g., Biesanz, 2012) has been one of the most popular approaches for analyzing the

interactions and reciprocal influences between variables over time. However, this model cannot investigate lasting effects, such as whether the change between two consecutive measurement time points is associated with further changes later in time (Mund & Nestler, 2019). An interesting alternative is the latent change score model (LCS; Kievit et al., 2018), which involve extensions of SEMs that have been developed for longitudinal, or repeated measures, data (McArdle, 2009). SEM, including LCS, allows for the simultaneous estimation of multiple relationships, including the specification of directed relations that correspond to hypothesized causal pathways. LCS has the advantage of combining the features of both growth models and CLPM (McArdle & Hamagami, 2001; McArdle, 2009; Steyer et al., 1997). Indeed, rather than investigating shifts in the rank order between two time points (as occurs in the CLPM), LCS models can examine the difference in a variable between two or more measurement time points (Castro-Schilo & Grimm, 2018). Differences between successive measurements are modeled in LCS as latent change factors. LCS can assess changes in an outcome compared to a starting value (Traut et al., 2021) without the use of change scores (i.e., measurement differences between baseline and follow-up periods), which do not estimate causal effects (Tennant et al., 2019). This modeling can easily and accurately investigate complex and critical training issues, such as (1) the estimation of interindividual differences in the initial levels and in training-related changes and (2) the characterization of complex (and possibly nonlinear) change trajectories, along with the determination of the factors influencing these trajectories. For instance, LCS models were recently used to test mutualism theory, which states that basic cognitive abilities directly and positively interact during development (Kievit et al., 2017). LCS models have shown that individuals with higher scores in one domain (e.g., vocabulary) exhibited greater gains in another domain (e.g., matrix reasoning) and vice versa (Kievit et al., 2017). Therefore, such an extended multivariate LCS model can provide a highly dynamic perspective on the analysis of second-order interdependencies across time (Mund & Nestler, 2019).

In this context, this study aimed to evaluate the effect of 5 weeks of computerized IC training on trained (IC) and nontrained (updating and switching) EFs in children and adolescents by using LCS models. A dedicated LCS model was developed to assess the transfer effects (1) directly from the estimation of the training-related changes in both the trained and nontrained tasks and (2) indirectly from the effects of the initial levels of each EF on the training-related changes of the other EFs (crossed effects). To evaluate the extent to which the transfer or the lack of transfer effects that have been reported in some studies may be due to the statistical approaches that have been used to reveal such a transfer, we systematically compared the transfer effects (as revealed by LCS) compared to those effects revealed with the use of classical repeated-measures ANOVAs.

## 2. Method

### 2.1. Participants

We recruited 135 participants from public schools (60 adolescents and 75 children). Of these, 103 completed a minimum of 15 training sessions and were included in this study (pre-hoc inclusion criteria, see Table 1): 57 children (24 males,  $M \pm SD = 9.79 \pm 0.55$  years, range = 9–10 years) and 46 adolescents (13 males,  $M \pm SD = 16.56 \pm 0.50$  years, range = 15–17 years). All of the participants were born full-term, had normal or corrected-to-normal vision, had no history of neurological disease and had no cerebral abnormalities. This sample was derived from a larger multimodal project including brain imaging data (Delalande et al., 2020) which required right handed participants (as determined by the Edinburgh Handedness Inventory; Oldfield, 1971).

Parents or legal guardians gave written informed consent for the children and adolescents (according to French regulation, minors cannot sign written consent), and all of the children and adolescents agreed to participate in the study. All of the participants were tested in accordance with the national and international norms that govern the use of human research participants. The national ethics committee (committee for the protection of persons, CPP) approved our study in children (ID-RCB 2015-A00383–46) and in adolescents (ID-RCB 2015-A00811–48).

### 2.2. Training sessions

Participants were asked to perform IC tasks (experimental or IC group) or knowledge- and vocabulary-based tasks (active control or AC group) 15 min per day, 5 days a week for 5 weeks (25 sessions) on a tactile tablet at home. Participants were randomly assigned to the IC or AC groups (see demographic information in Table 1). The AC condition allowed us to control for test-retest effects and complied with the recommendations of several meta-analyses (Diamond & Ling, 2016; Melby-Lervåg & Hulme, 2013; Morrison & Chein, 2011; Wujcik et al., 2017). In both IC and AC training, the difficulty progressively increased and adapted in real time to the learning curve of each participant to maintain the motivation of the participant and to prevent automaticity (Buschkuhl et al., 2012; Green & Bavelier, 2008; Klingberg, 2010). All of the tasks were implemented on the tablet by using E-prime 2.0.

**Table 1**  
Demographic characteristics of the sample by training group.

	Children		Adolescents	
	IC-training	AC-training	IC-training	AC-training
Age (mean $\pm$ SD)	9.68 $\pm$ 0.53	9.90 $\pm$ 0.56	16.65 $\pm$ 0.54	16.47 $\pm$ 0.44
Gender (M/F)	12/15	12/18	7/16	6/17

Abbreviations. AC: active control; IC: inhibitory control.

### 2.2.1. AC training

The AC training, adapted from Jaeggi et al. (2011), consisted of general knowledge tasks or "General Questions Game" (e.g., *What type of skiing is done on water?*) and academic skills or "Specific Questions Game" (e.g., *What is the number of grams in ½ kg?*), adapted to the participant age. Each question required the participant to answer within 30 s by touching one of the 4 answers provided on the touch pad. An online pre-test carried out with more than 1600 children and adolescents allowed the selection of the questions and their organization in levels of difficulty. As with the IC training, the control tasks were organized into 8 levels of difficulty, each consisting of 10 questions. If the rate of correct answers was higher than 90%, the level was validated, and the participant moved on to the next level. If this rate was lower than 70%, the participant returned to the lower level. Finally, if the rate of correct answers was between 70% and 90%, the level remained the same.

### 2.2.2. IC training

The IC training included two tasks involving interference control (color-word Stroop task) and response inhibition (stop signal task) because IC is a multidimensional construct (Diamond, 2013) and transfer effects can be potentially larger when the same cognitive function is trained via different tasks (Buschkuhl et al., 2012; Green & Bavelier, 2008).

During a Stroop or "Word and Color Game" session, participants had to press the button whose color corresponded to the ink color of the word presented among the four (red, blue, yellow, green) proposed on the tablet. The task was composed of congruent items where the ink color corresponded to the word (e.g., RED written in red) and incongruent items where the ink color differed from the word presented (e.g., RED written in green). Control items where the word was presented written in black (e.g., RED) were also proposed. Subjects were then instructed to press the colored button corresponding to the color designated by the word. All stimuli were presented in the center of the tablet screen in Arial font, bold, size 24. Each training session consisted of 13 control, 13 congruent, and 13 incongruent items. As the training sessions progressed, the difficulty of the task increased by decreasing the SOA (stimulus onset asynchrony), i.e., the delay between the presentation of the word (written in light grey) and its coloring in one of the four colors. The SOA of the first level was 450 ms and decreased by 50 ms per level until it reached 100 ms at level 8. If the rate of correct answers per block was greater than 90%, the level was validated and the participant moved on to the next level. If this rate was lower than 70%, the participant went back to the lower level. Finally, if the number of correct answers was between 70% and 90%, the level remained the same.

During a stop signal session, participants had to press one of the two response buttons (the left or the right one) on the touchpad to indicate in which direction the arrow on the screen was pointing (go trials), except when a beep sounded, in which case they had to hold back their response (stop trials). Each training session began with 16 go trials and was followed by 30 go trials and 10 randomly assigned stop trials. The difficulty increased by expanding SOA, the time between the presentation of the arrow and the stop signal. The SOA in the first level was 100 ms and increased by 50 ms per level until it reached 450 ms in level 8. If the success rate of the stop trials was greater than 80% and the success rate of the go trials was greater than 90%, the level was validated and the participant moved on to the next level. If the success rate was less than 60% for the stop trials and/or less than 80% for the go trials, the participant returned to the lower level. Finally, for intermediate accuracy scores, the level remained the same.

At the end of each level, based on the achieved accuracy, participants earned points that they could redeem at the end of the 25 training sessions for a small gift (books and card or board games). On each task of each training session, participants started the session with the difficulty level set at one level below the level that they had achieved on the last level of the previous training session. At the end of each training session, parents were instructed to send the data file that was generated by using E-prime 2.0, and participants were asked to complete a short written qualitative autoevaluation of their motivation and engagement during the session. We ensured that the included participants completed a minimum of 15 training sessions.

### 2.3. EF evaluation in pre- and post-training sessions

Participants performed the following four EF tasks in the pre- and post-training sessions: a stop signal task, a color-word Stroop task, a trail making test (TMT) and a N-back task to assess IC, switching and updating, respectively.

In the stop signal task, each trial began with the presentation of a circle for 250 ms, after which an arrow appeared in the circle. Participants were then instructed to click the left mouse button as quickly as possible if the arrow pointed left and the right mouse button if the arrow pointed right. Specifically, the participants were asked to not wait for a stop signal and that the task was difficult because it was designed so that they would fail 50% of the time. If a tone (the stop signal, 750 Hz, 75 ms) sounded after a variable delay (the stop signal delay, SSD) following the presentation of the arrow, then the subjects were instructed to inhibit their response by not clicking any buttons. When regarding the stop trials, the task was adaptive in difficulty. The SSD was initially set at 350 ms and increased by 50 ms after each successful stop trial to a maximum of 1150 ms and decreased by 50 ms after each failed stop trial to a minimum of 50 ms. This tracking procedure, which was previously recommended (Verbruggen et al., 2019), allowed us to approach a probability of 0.50 to fit the horse race model theory. Each trial lasted 2000 ms, during which participants could respond. After the completion of the two training blocks (one block to familiarize the participants with the response modalities and another block to allow the participants to become familiar with the real task), the task, which consisted of 64 trials (including 16 stop trials and 48 go trials), was initiated. Every block was counterbalanced in terms of stimulus orientation (as many arrows pointing to the left as to the right).

The color-word Stroop task presented in the cognitive battery was composed of 32 pairs of stimuli, for a total of 64 trials. A fixation cross of 1500 ms separated the pairs of stimuli. Within each pair, a faster fixation cross of 500 ms separated the presentation of the two trials. These trials were presented in the center of the screen, in Courier New font, bold, size 24, on a gray background. Participants responded by pressing a key on the keyboard, 's' for yellow and blue, 'l' for red and green. Each trial was presented for a duration of

3000 ms, and in order for their response to be taken into account, participants were required to respond during this stimulus presentation period. Thus, the response times were reduced compared to the training condition. At each trial, the response time (RT) was measured from the stimulus onset to the button press. For each participant, we computed the mean RTs in milliseconds on correctly performed trials for congruent and incongruent items. In the incongruent condition, only trials with both perceptual and motor incongruity (response button different for target and distractor) were considered, since for trials with only perceptual incongruity (response button identical for target and distractor), it is impossible to decipher whether a correct button response is based on the target (ink color or face) or the written word to be inhibited. Of note, previous developmental studies have reported a more sensitive interference score calculated from RTs than from accuracy rates (Aïte et al., 2018; Klenberg et al., 2015).

To limit potential difference in the familiarity with the IC tasks used in the pre- and post-test sessions between participants of the IC and AC group, a number of differences between these two IC tasks and the ones used in the IC training sessions were introduced: (a) in the color-word Stroop task, there were no control trials and the difficulty of the tasks did not vary and (b) in the Stop Signal task, the SSD was adapted on a trial-by-trial basis and not on a block-of-trial basis as in the training.

The TMT was adapted for children and adolescents in number of stimuli to connect. Instead of 25 numbers in Part A, only 15 numbers were present on the page. Similarly, Part B contained numbers from 1 to 8 and letters from A to G. Before Part A & Part B, participants received a short training period to ensure that they understood the instructions. The participants were timed separately for Part A and Part B. If they made a mistake by connecting the wrong numbers (Part A) or numbers to letters (Part B), they were told that they made an error and were invited to correct it.

The N-back was divided into three levels. At each level, a black square was presented on a gray font screen. The participants were instructed to press the left mouse button when the square on the screen was at the same position as the square that appeared  $n$  trials before; otherwise, they were instructed to click the right button. Therefore, when the task started with the first level where  $n = 1$ , they were asked to press the left mouse button when the square on the screen was at the same position as the square that appeared one trial before; otherwise, they clicked the right button. All of the experimental blocks ( $n = 1, 2$  or  $3$ ) contained 20 experimental trials with a stimulus to compare the target.

IC efficacy was assessed from (1) the stop signal task by using the stop signal reaction time (SSRT), as recommended in previous studies (Verbruggen et al., 2019) and (2) the Stroop interference score calculated as the difference between the RT in congruent and incongruent trials. The switching efficacy was obtained from the TMT by using the RT difference between TMT-B and TMT-A. The updating efficacy was obtained from the N-back task score by using the RT (in seconds) difference between the 2- and 1-back trials. This updating difference score was built to 'normalize' the RT, similarly to the difference scores used in the Stroop and TMT. A similar approach was used in Loughead et al. (2009). Of note, by using these definitions, lower EF scores corresponded to higher EF efficiency.

For each task, relative changes were screened and cleaned for possible aberrant values by using a nonparametric approach. Specifically, values lower than 'median - 2.5 MAD' or greater than 'median + 2.5 MAD' (MAD, or the median absolute deviation) were considered to be outliers.

#### 2.4. LCS modeling framework

We fitted multivariate LCS models, as in previous studies (Kievit et al., 2017; McArdle & Hamagami, 2001; McArdle, 2009). Of note, the LCS model conceptualizes the difference between successive measurements as latent change factors, which allowed us to directly model within-subjects changes as a function of structural parameters (McArdle & Hamagami, 2001).

The basic equation of the LCS model specifies the score of individual  $i$  on test  $Y$  (Stop Signal, TMT or N-back scores) at pre-training and post-training as a sum of the score at baseline (pretraining) and a change, or difference, score as follows:

$$Y_{i,post} = \beta Y_{i,pre} + \Delta Y_{i,post}$$

By setting the regression weight  $\beta$  to 1 (McArdle & Hamagami, 2001), the LCS allowed us to rewrite the change scores as follows:

$$\Delta Y_{i,post} = Y_{i,post} - Y_{i,pre}$$

These change scores were then modeled as indicators of a latent factor of change scores. The intercept provides approximately identical results as a paired-sample t-test when comparing differences across two measurement occasions; however, it provides two additional parameters (Kievit et al., 2017): the variance in the change scores (i.e., whether individuals change homogeneously or not over time) and the regression between the scores at pretest (baseline) and the change scores (i.e., whether change varies according to the baseline score).

We extended the basic univariate LCS model to a multivariate LCS model by modeling the change scores on three tasks ( $Y1$ ,  $Y2$  and  $Y3$ ), which corresponded to the stop signal, TMT and N-back scores, respectively, with the tasks being functions of three processes: a self-feedback process ( $\beta$ ) and two coupling processes ( $\gamma$ ), as follows:

$$\Delta Y1_{i,post} = \beta Y1_{i,pre} + \gamma_2 Y2_{i,pre} + \gamma_3 Y3_{i,pre}$$

The self-feedback parameter ( $\beta$ ) reflects a combination of effects, including regression to the mean and a dampening effect induced by an end horizon for rapid development (i.e., individuals reaching their performance ceiling; Kievit et al., 2017). The coupling parameters ( $\gamma$ ) demonstrate whether the change in  $Y1$  is determined by the pretest scores in  $Y2$  and  $Y3$  (and vice versa; Kievit et al., 2017); thus, they index the degree to which the change in one EF is affected by the baseline level of another EF, above and beyond the self-feedback parameter.

We fitted a model that predicts multivariate coupling between the three EFs. We also added the number of training sessions as a covariate in the model. Additionally, we a priori anticipated that a higher baseline level in the stop signal would lead to larger differences in TMT and N-back scores and vice versa (see Fig. 1).

2.5. Model fit and comparison

LCS models were estimated with the *lavaan* software package (Version 6.8; Rosseel, 2012) in R by using full information maximum likelihood with robust standard errors to account for missingness and nonnormality.

Overall model fit was assessed by using standard indices (Schermelleh-Engel et al., 2003), including the chi-square test, the root-mean-square error of approximation (RMSEA; acceptable fit: < 0.08, good fit: < 0.05), the comparative fit index (CFI; acceptable fit: 0.95–0.97, good fit: > 0.97) and the standardized root-mean-square residual (SRMR; acceptable fit: 0.05–0.10, good fit: < 0.05).

2.6. Repeated-measures ANOVAs

To evaluate the relevance of LCS, the same training data were also analyzed by using the classical univariate repeated-measures analysis of variance (ANOVA). Like for SEM analyses, ANOVAs were conducted separately for each of the four EF tasks for the two age groups and the two training groups. In order to assess possible group-specific effects, complementary ANOVAs were run for each task, including age group (children vs adolescents) and training group (IC vs AC) in the models.

The repeated-measures ANOVAs were estimated using mixed-effects linear models. We used the package *lme4* (Bates et al., 2012) with the Time (*pre-* or *post-training*) as fixed effects and intercepts for subjects as random effects. P-values were obtained by using likelihood ratio tests of the full model, including the tested effect against the model without the tested effect.

3. Results

3.1. Repeated-measures ANOVAs

The classical repeated-measures ANOVAs applied to the two age groups and the two training groups separately detected a significant change in the Stop Signal ( $p < 0.05$ ) and Stroop ( $p < 0.05$ ) along with a marginal change in TMT ( $p = 0.09$ ) for children after IC training. In adolescents, a significant change in the Stop Signal was detected following AC training ( $p < 0.05$ ). All the other analyses

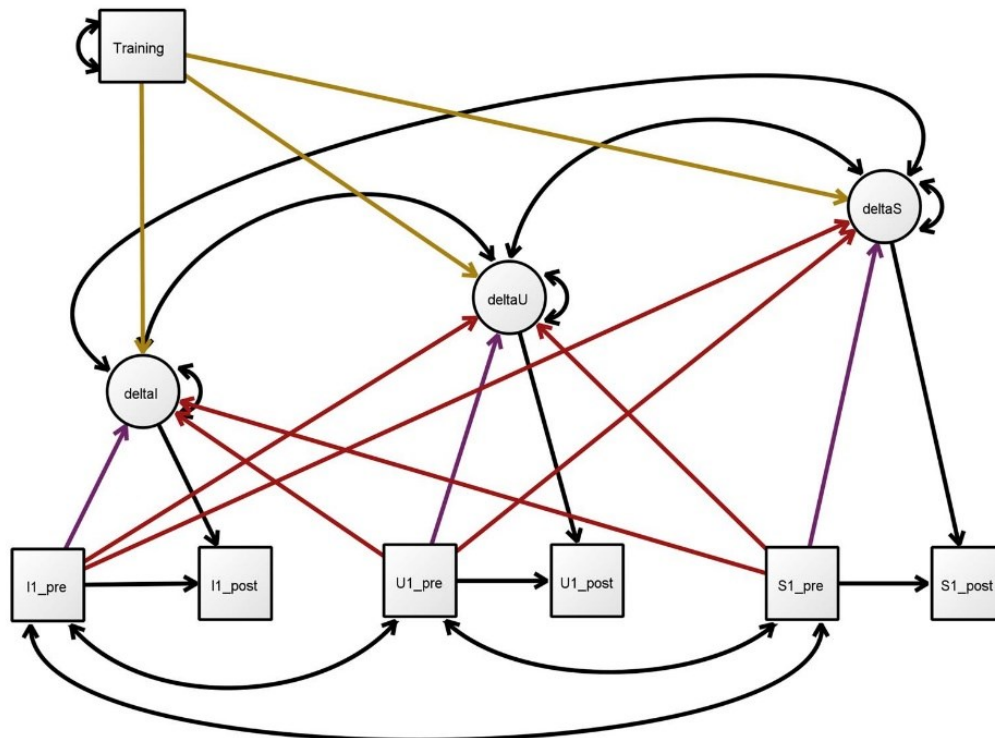


Fig. 1. Graphic illustration of the LCS model used to analyze the executive training data. Training (i.e. number of training sessions) was entered as a covariate of the latent change scores for IC abilities (deltaI), updating abilities (deltaU) and switching abilities (deltaS). Circles indicate latent variables, and rectangles indicate observed variables. Thick single-headed arrows indicate regressions. Double-headed arrows indicate variance and covariance. The figure was computed with  $\Omega$ nyx software (von Oertzen et al., 2015).



**Table 2**

Efficiency of EFs in children and adolescents before and after an active control (AC) or an inhibitory control (IC) training.

	Children				Adolescents			
	Pre IC-training Mean ± SD	Pre AC-training Mean ± SD	Post IC-training Mean ± SD	Post AC-training Mean ± SD	Pre IC-training Mean ± SD	Pre AC-training Mean ± SD	Post IC-training Mean ± SD	Post AC-training Mean ± SD
SST	0.26 ± 0.08	0.25 ± 0.08	<b>0.21 ± 0.06 *</b>	0.23 ± 0.08	0.16 ± 0.03	0.16 ± 0.03	0.15 ± 0.04	0.16 ± 0.03
Stroop	0.11 ± 0.16	0.13 ± 0.15	<b>0.06 ± 0.10 *</b>	0.08 ± 0.16	0.07 ± 0.09	0.09 ± 0.08	0.04 ± 0.05	<b>0.06 ± 0.07 *</b>
TMT	22.14 ± 12.01	18.18 ± 10.04	<b>16.40 ± 9.07 ♦</b>	15.03 ± 6.66	6.87 ± 3.63	9.62 ± 4.73	7.83 ± 4.33	8.71 ± 4.15
N-back	0.09 ± 0.23	0.10 ± 0.20	0.06 ± 0.23	0.12 ± 0.24	0.04 ± 0.07	0.06 ± 0.08	0.07 ± 0.11	0.09 ± 0.11

For all tasks, scores were derived from RTs (in s). Training-related changes in task efficiency were evaluated with repeated measures ANOVAs. Significance levels: ♦ < 0.10; \* < 0.05; \*\* < 0.01; \*\*\* < 0.001. SST = Stop Signal Task; TMT = Trail Making Test.

failed to reach significance (all  $p$  values  $> 0.14$ ). Raw pretraining and post-training scores for the three EF tasks are shown in Table 2.

Complementary analyses, investigating possible interaction with age and training groups, revealed a significant main effect of the age group for SST ( $p = 1.3 \times 10^{-5}$ ) and for TMT ( $p = 0.01$ ). All other main and interaction effects, including for the analyses of Stroop and N-Back scores, were not significant (all  $p$ s  $> 0.27$ ; see details of the analyses in Table S1).

Post-hoc analyses, with Tukey correction for multiple testing, revealed significant pre-post changes in children in IC group for SST ( $p = 0.009$ ) and TMT ( $p = 0.03$ ).

### 3.2. LCS models

Data were then analyzed by using LCS models. One task for each EF was included to have balanced models: SST or Stroop interference for IC abilities, N-Back for updating abilities and TMT for switching abilities.

Two LCS models were fitted and compared to investigate the age and training effects. In the first model, referred to as the 'constrained model', all of the parameters were constrained to be equal in the four groups (Children-IC\_pre = Children-AC\_pre & Adolescents-IC\_pre = Adolescents-AC\_pre & Children-IC\_post = Children-AC\_post = Adolescents-IC\_post = Adolescents-AC\_post), assuming the same training effects regardless of the training session and the age group. In the second model, referred to as the 'free model', the parameters were only constrained to be equal at the pretest period for each age group (Children-IC\_pre = Children-AC\_pre & Adolescents-IC\_pre = Adolescents-AC\_pre), assuming that the training effects were specific to the training session and the age group. In both models, the baseline scores were constrained to be equal in each training group, assuming a similar level before training because the participants were randomly assigned to the different training groups but were left free in each age group, when assuming that children and adolescents do not have the same EF abilities before training.

With SST as IC measure, the *free model* fitted the data significantly better than the *constrained model* ( $\chi^2 [54] = 135.58$ ,  $p < 0.001$ ), thus indicating that the changes in EFs are not the same according to the type of training and participants' ages. Of note, the *free model* fit the data well according to the classical LCS metrics ( $\chi^2 [30] = 23.65$ ,  $p = 0.79$ ; RMSEA = 0.00, 90% confidence interval [CI] = [0.00, 0.11]; CFI = 1.00; SRMR = 0.11; Yuan-Bentler scaling factor = 0.84). Similarly, with Stroop as IC measure, the *free model* fitted the data significantly better than the *constrained model* ( $\chi^2 [54] = 187.68$ ,  $p < 0.001$ ), reflecting that the changes in EFs are not the same according to the type of training and participants' ages. The *free model* fit the data well according to the classical LCS metrics ( $\chi^2 [30] = 18.92$ ,  $p = 0.94$ ; RMSEA = 0.00, 90% confidence interval [CI] = [0.00, 0.03]; CFI = 1.00; SRMR = 0.11; Yuan-Bentler scaling factor = 0.91). For all of these reasons, the Stop Signal and Stroop *free models* were subsequently selected and further investigated in the different training and age groups. A summary of the fit indices of the two models for the two IC measures can be found in Table 3. Details of the model estimations can be found in Table 4 with Stop Signal as IC measure and in Table 5 with Stroop as IC measure.

### 3.3. LCS model in children with stop signal task as IC measure

Analysis of the *free LCS model* with the Stop Signal (Fig. 2) at pretest in children revealed that TMT was marginally correlated with both Nback ( $r = -0.73$ ,  $SE = 0.44$ ,  $z = -1.67$ ,  $p = 0.10$ ) and Stop Signal ( $r = 0.25$ ,  $SE = 0.14$ ,  $z = 1.79$ ,  $p = 0.07$ ) scores.

In the experimental group (IC), the intercepts for the latent change score were significant for the Stop Signal (0.18,  $SE = 0.08$ ,  $z = 2.28$ ,  $p < 0.05$ ) and N-back ( $-0.84$ ,  $SE = 0.32$ ,  $z = -2.61$ ,  $p < 0.01$ ) tasks and marginal for TMT ( $-18.53$ ,  $SE = 9.99$ ,  $z = -1.86$ ,  $p = 0.06$ ), thus indicating significant changes in all of the EF scores after IC training. The self-feedback parameters were significantly negative for the Stop Signal ( $-0.82$ ,  $SE = 0.18$ ,  $z = -4.58$ ,  $p < 0.001$ ) and TMT ( $-1.01$ ,  $SE = 0.28$ ,  $z = -3.54$ ,  $p < 0.001$ ) tasks and marginal for the N-back task ( $-0.28$ ,  $SE = 0.16$ ,  $z = -1.81$ ,  $p = 0.07$ ), thus indicating that higher initial scores (and thus a lower EF ability) on one EF task corresponded to greater gains on that task. An analysis of the coupling parameters, which indicated crossed effects between gains in one EF and initial performance in the two other EFs, showed that individuals with the larger improvement on the TMT had a higher Stop Signal score (i.e., a lower IC ability;  $61.11$ ,  $SE = 23.77$ ,  $z = 2.57$ ,  $p < 0.05$ ) and a lower N-back score (i.e., a better updating ability;  $-15.14$ ,  $SE = 8.18$ ,  $z = -1.85$ ,  $p = 0.06$ ) at baseline. Additionally, children with a higher TMT score (i.e., a poorer switching ability) at baseline improved more on the N-back (0.01,  $SE = 0.00$ ,  $z = 1.95$ ,  $p = 0.05$ ). Finally, the number of training sessions was significantly related to latent change in TMT (1.04,  $SE = 0.44$ ,  $z = 2.37$ ,  $p < 0.05$ ) and N-back (0.03,  $SE = 0.01$ ,  $z = 2.17$ ,  $p < 0.05$ ) but not for the Stop Signal ( $p = 0.83$ ) scores.

In the control training group (AC), there were no significant intercepts for the latent variables related to the EF score changes (all  $p$  values  $> 0.65$ ), thus indicating no significant changes in EF scores after AC training. However, in contrast to the IC group, the latent change scores related to SST and to TMT were negatively correlated ( $r = -0.17$ ,  $SE = 0.08$ ,  $z = -2.07$ ,  $p < 0.05$ ), thus indicating that increased performance in SST following training was associated with a decreased performance in TMT following training. As in the IC group, all of the self-feedback parameters were significantly negative (all  $p$  values  $< 0.01$ ). The coupling parameters were not

**Table 3**

Fit indices for the free LCS model and constrained LCS model. A robust estimation of the parameters was used.

IC measure	Model	$\chi^2$	df	RMSEA	CFI	SRMR	Selected model
<b>Stop Signal</b>	LCS constrained	157.676	84	0.185 [0.134–0.233]	0.000	0.305	
	LCS free	23.648	30	0.000 [0.000–0.113]	1.000	0.106	x
<b>Stroop</b>	LCS constrained	198.001	84	0.230 [0.184–0.275]	0.000	0.361	
	LCS free	18.921	30	0.000 [0.000–0.029]	1.000	0.108	x

**Table 4**  
Summary of the LCS analyses with Stop Signal as IC measure.

	Children						Adolescents					
	IC group			AC group			IC group			AC group		
	Estimate ± SE	z	P	Estimate ± SE	z	p	Estimate ± SE	z	p	Estimate ± SE	z	p
<b>Baseline effects (β)</b>												
Stop Signal	-0.815 ± 0.178	-4.580	< 0.001	-0.568 ± 0.168	-3.374	< 0.01	-1.010 ± 0.391	-2.580	< 0.05	-0.919 ± 0.157	-5.859	< 0.001
N-back	-0.282 ± 0.156	-1.813	0.070	-0.267 ± 0.102	-2.622	< 0.01	-0.147 ± 0.136	-1.084	0.279	-0.645 ± 0.230	-2.804	< 0.01
TMT	-1.006 ± 0.284	-3.543	< 0.001	-0.748 ± 0.208	-3.589	< 0.001	-0.432 ± 0.233	-1.857	0.063	-0.907 ± 0.137	-6.633	< 0.001
<b>Crossed effects (γ)</b>												
N-back → Stop Signal change	-0.059 ± 0.057	-1.047	0.295	-0.199 ± 0.050	-3.954	< 0.001	0.234 ± 0.122	1.917	0.055	0.151 ± 0.065	2.325	< 0.05
TMT → Stop Signal change	-0.001 ± 0.001	-1.222	0.222	-0.001 ± 0.002	-0.546	0.585	-0.001 ± 0.002	-0.232	0.816	0.001 ± 0.001	0.596	0.551
Stop Signal → N-back change	0.518 ± 0.344	1.503	0.133	-0.336 ± 0.667	-0.503	0.615	-0.220 ± 0.465	-0.473	0.636	1.540 ± 0.720	2.140	< 0.05
TMT → N-back change	0.007 ± 0.003	1.952	0.051	-0.001 ± 0.005	-0.193	0.847	0.003 ± 0.003	1.096	0.273	0.006 ± 0.005	1.256	0.209
Stop Signal → TMT change	61.107 ± 23.767	2.571	< 0.05	-2.864 ± 20.715	-0.138	0.890	-15.788 ± 31.260	-0.505	0.614	29.667 ± 25.768	1.151	0.250
N-back → TMT change	-15.141 ± 8.176	-1.852	0.064	3.987 ± 7.953	0.501	0.616	12.121 ± 9.612	1.261	0.207	-13.003 ± 9.116	-1.426	0.154
<b>Number of sessions effects</b>												
Stop Signal	0.001 ± 0.003	0.210	0.833	0.006 ± 0.004	1.401	0.161	0.000 ± 0.002	0.182	0.856	0.003 ± 0.003	0.915	0.360
N-back	0.028 ± 0.013	2.171	< 0.05	0.003 ± 0.020	0.163	0.870	0.002 ± 0.006	0.292	0.771	0.006 ± 0.010	0.581	0.561
TMT	1.039 ± 0.440	2.361	< 0.05	0.675 ± 0.782	0.864	0.388	0.063 ± 0.228	0.278	0.781	0.417 ± 0.259	1.610	0.107
<b>Covariances</b>												
Stop Signal & N-back changes	-0.001 ± 0.002	-0.402	0.688	0.001 ± 0.002	0.295	0.768	0.000 ± 0.000	-0.966	0.334	0.000 ± 0.001	-0.708	0.479
Stop Signal & TMT changes	0.105 ± 0.078	1.342	0.180	-0.169 ± 0.082	-2.068	< 0.05	0.001 ± 0.021	0.050	0.960	0.034 ± 0.020	1.711	0.087
N-back & TMT changes	0.194 ± 0.219	0.889	0.374	0.121 ± 0.379	0.319	0.749	0.108 ± 0.055	1.981	< 0.05	0.033 ± 0.072	0.459	0.646
Stop Signal & N-back baselines	0.002 ± 0.002	0.807	0.419	0.002 ± 0.002	0.807	0.419	-0.001 ± 0.000	-1.603	0.109	-0.001 ± 0.000	-1.603	0.109
Stop Signal & TMT baselines	0.248 ± 0.138	1.792	0.073	0.248 ± 0.138	1.792	0.073	-0.006 ± 0.036	-0.164	0.869	-0.006 ± 0.036	-0.164	0.869
N-back & TMT baselines	-0.734 ± 0.440	-1.670	0.095	-0.734 ± 0.440	-1.670	0.095	-0.016 ± 0.067	-0.241	0.810	-0.016 ± 0.067	-0.241	0.810
<b>Intercepts</b>												
Stop Signal change	0.182 ± 0.080	2.276	< 0.05	0.042 ± 0.091	0.461	0.645	0.139 ± 0.068	2.045	< 0.05	0.067 ± 0.069	0.974	0.330
N back change	-0.836 ± 0.320	-2.609	< 0.01	0.098 ± 0.442	0.222	0.824	-0.006 ± 0.147	-0.041	0.967	-0.370 ± 0.223	-1.660	0.097
TMT change	-18.531 ± 9.985	-1.856	0.063	-2.721 ± 18.407	-0.148	0.882	3.973 ± 8.683	0.458	0.647	5.717 ± 7.757	-0.737	0.461
Training sessions	19.889 ± 0.523	38.003	< 0.001	20.3 ± 0.415	48.869	< 0.001	23.457 ± 0.712	32.958	< 0.001	22.783 ± 0.522	43.680	< 0.001

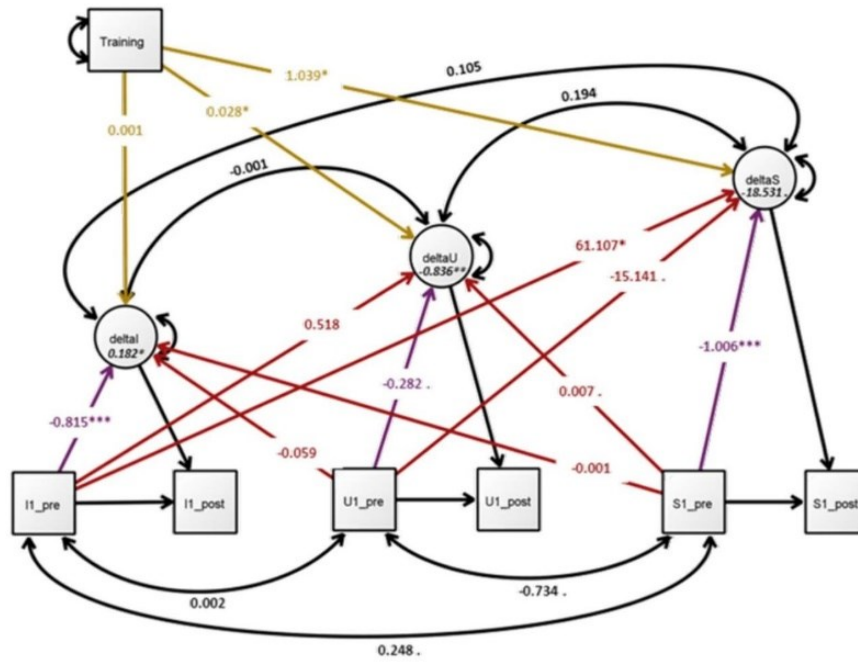
Abbrev. SE: Standard error.

**Table 5**  
Summary of the LCS analyses with Stroop as IC measure.

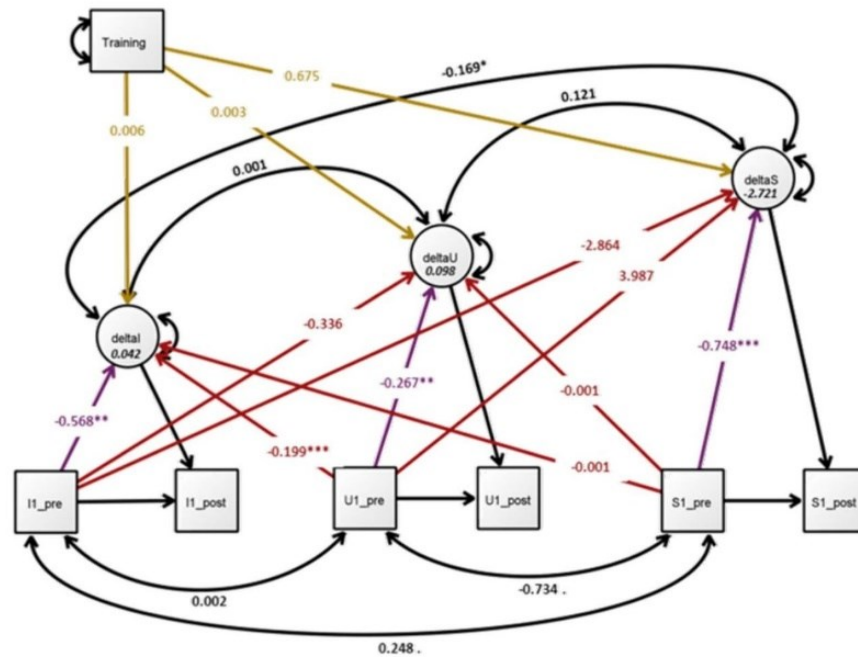
	Children						Adolescents					
	IC group			AC group			IC group			AC group		
	Estimate ± SE	z	P	Estimate ± SE	z	p	Estimate ± SE	z	p	Estimate ± SE	z	p
<b>Baseline effects (β)</b>												
Stroop	<b>-0.886 ± 0.137</b>	<b>-6.481</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>-0.646 ± 0.178</b>	<b>-3.628</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>-0.877 ± 0.139</b>	<b>-6.318</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>-0.953 ± 0.183</b>	<b>-5.200</b>	<b>&lt; 0.001</b>
N-back	<b>-0.268 ± 0.142</b>	<b>-1.895</b>	<b>0.058</b>	<b>-0.251 ± 0.131</b>	<b>-1.925</b>	<b>0.054</b>	-0.118 ± 0.120	-0.981	0.326	<b>-0.800 ± 0.207</b>	<b>-3.856</b>	<b>&lt; 0.001</b>
TMT	<b>-1.115 ± 0.248</b>	<b>-4.492</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>-0.749 ± 0.169</b>	<b>-4.430</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>-0.579 ± 0.208</b>	<b>-2.786</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>-1.131 ± 0.155</b>	<b>-7.280</b>	<b>&lt; 0.001</b>
<b>Crossed effects (γ)</b>												
N-back → Stroop change	-0.003 ± 0.083	-0.034	0.973	-0.077 ± 0.206	-0.374	0.708	0.134 ± 0.127	1.054	0.292	0.067 ± 0.146	0.462	0.644
TMT → Stroop change	<b>0.005 ± 0.001</b>	<b>3.820</b>	<b>&lt; 0.001</b>	-0.004 ± 0.004	-1.175	0.240	-0.003 ± 0.002	-1.618	0.106	<b>-0.009 ± 0.004</b>	<b>-2.194</b>	<b>&lt; 0.05</b>
Stroop → N-back change	0.191 ± 0.174	1.093	0.274	<b>-0.507 ± 0.280</b>	<b>-1.812</b>	<b>0.070</b>	-0.033 ± 0.221	-0.148	0.882	0.242 ± 0.309	0.784	0.433
TMT → N-back change	<b>0.007 ± 0.003</b>	<b>2.576</b>	<b>&lt; 0.05</b>	<b>-0.006 ± 0.003</b>	<b>-1.784</b>	<b>0.074</b>	0.003 ± 0.003	1.075	0.283	0.005 ± 0.005	0.868	0.385
Stroop → TMT change	<b>25.011 ± 12.136</b>	<b>3.820</b>	<b>&lt; 0.05</b>	<b>24.295 ± 11.693</b>	<b>2.078</b>	<b>&lt; 0.05</b>	<b>23.150 ± 6.751</b>	<b>3.429</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>28.118 ± 8.313</b>	<b>3.382</b>	<b>&lt; 0.001</b>
N-back → TMT change	<b>-14.699 ± 7.813</b>	<b>-1.881</b>	<b>0.060</b>	6.167 ± 7.169	0.860	0.390	<b>19.628 ± 4.259</b>	<b>4.608</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>-22.373 ± 8.031</b>	<b>-2.786</b>	<b>&lt; 0.01</b>
<b>Number of sessions effects</b>												
Stroop	0.003 ± 0.006	0.458	0.647	-0.018 ± 0.011	-1.639	0.101	-0.001 ± 0.002	-0.946	0.344	0.008 ± 0.006	1.211	0.226
N-back	0.021 ± 0.014	1.558	0.119	0.003 ± 0.017	0.180	0.857	-0.003 ± 0.006	-0.600	0.549	0.005 ± 0.010	0.516	0.606
TMT	0.570 ± 0.441	1.293	0.196	-0.033 ± 0.766	-0.043	0.965	0.198 ± 0.125	1.574	0.115	0.383 ± 0.236	1.622	0.106
<b>Covariances</b>												
Stroop & N-back changes	0.003 ± 0.002	1.206	0.228	-0.004 ± 0.004	-0.972	0.331	0.000 ± 0.001	0.197	0.844	0.000 ± 0.002	0.089	0.929
Stroop & TMT changes	0.029 ± 0.159	0.181	0.856	<b>0.301 ± 0.160</b>	<b>1.877</b>	<b>0.061</b>	-0.027 ± 0.025	-1.057	0.290	<b>0.095 ± 0.037</b>	<b>2.551</b>	<b>&lt; 0.05</b>
N-back & TMT changes	0.314 ± 0.220	1.431	0.152	0.151 ± 0.256	0.593	0.553	<b>0.103 ± 0.040</b>	<b>2.576</b>	<b>&lt; 0.05</b>	0.026 ± 0.066	0.395	0.693
Stroop & N-back baselines	0.008 ± 0.005	1.596	0.110	0.008 ± 0.005	1.596	0.110	-0.000 ± 0.001	-0.139	0.889	-0.000 ± 0.001	-0.139	0.889
Stroop & TMT baselines	-0.034 ± 0.333	-0.101	0.919	-0.034 ± 0.333	-0.101	0.919	0.110 ± 0.069	1.603	0.109	0.110 ± 0.069	1.603	0.109
N-back & TMT baselines	<b>-0.747 ± 0.433</b>	<b>-1.723</b>	<b>0.085</b>	<b>-0.747 ± 0.433</b>	<b>-1.723</b>	<b>0.085</b>	0.008 ± 0.068	0.113	0.910	0.008 ± 0.068	0.113	0.910
<b>Intercepts</b>												
Stroop change	-0.110 ± 0.111	-0.989	0.323	0.490 ± 0.299	1.638	0.101	<b>0.084 ± 0.049</b>	<b>1.732</b>	<b>0.083</b>	-0.038 ± 0.135	-0.285	0.776
N back change	<b>-0.618 ± 0.316</b>	<b>-1.953</b>	<b>0.051</b>	0.168 ± 0.330	0.509	0.611	0.085 ± 0.146	0.580	0.562	0.106 ± 0.205	-0.518	0.604
TMT change	5.215 ± 10.536	0.495	0.621	7.354 ± 16.747	0.439	0.661	-2.657 ± 3.698	-0.718	0.472	0.208 ± 5.423	-0.038	0.969
Training sessions	<b>20.704 ± 0.531</b>	<b>38.982</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>20.300 ± 0.415</b>	<b>48.869</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>24.304 ± 0.824</b>	<b>29.508</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>22.783 ± 0.522</b>	<b>43.680</b>	<b>&lt; 0.001</b>

Abbrev. SE: Standard error.

**IC group**



**AC group**



**Fig. 2.** Estimated parameters for the LCS model in children without equality constraints between groups: IC group (experimental) on top and AC group (control) on bottom. Further results are given in Table 4. I1 = stop signal; U1 = N-back; S1 = TMT; pre = before training; post = after training.

significant (all p values > 0.59) except for updating; specifically, children who had a lower N-back score (i.e., a better performance) at pretest improved more in IC (-0.20, SE = 0.05, z = -3.95, p < 0.001).

**3.3.1. LCS model in adolescents with Stop Signal task as IC measure**

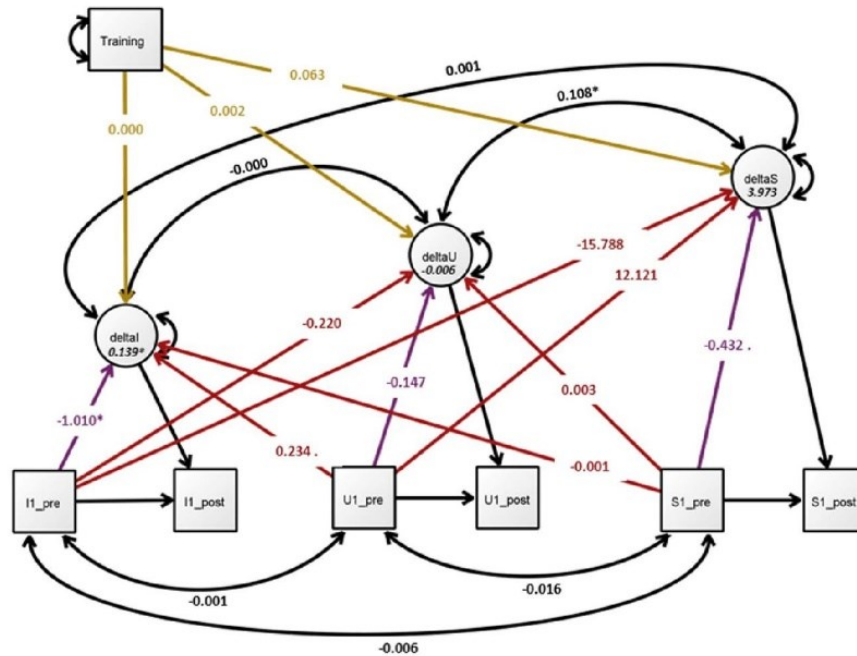
The analysis at the pretest of free LCS model with the Stop Signal in adolescents (Fig. 3) did not reveal any significant correlation between any of the EF task scores (all p values > 0.11).

In the experimental group (IC), the latent change intercept for the Stop Signal was significant (0.14, SE = 0.07, z = 2.05, p < 0.05; all other p values > 0.65), thus indicating a significant change in Stop Signal scores after IC training, but not in the TMT or N-back

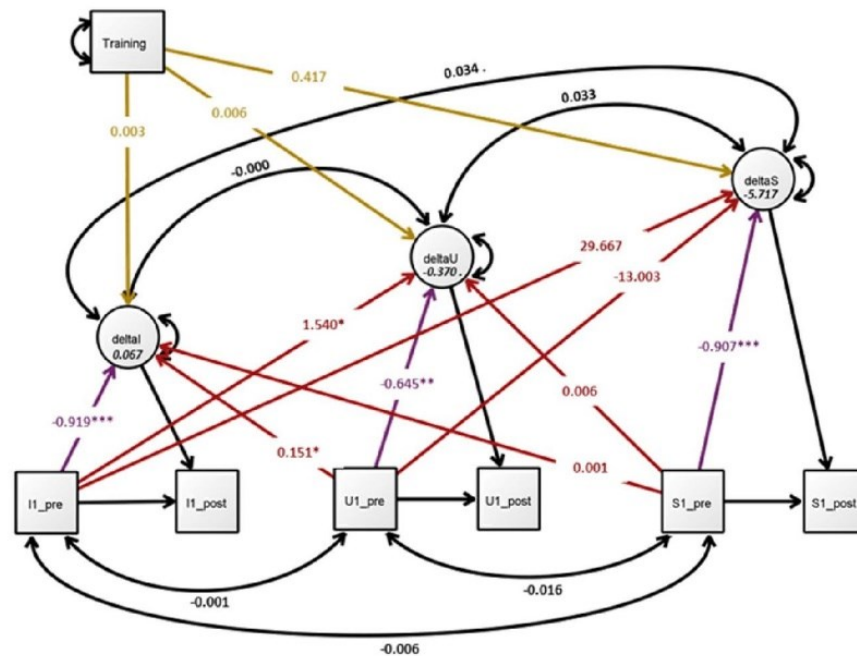
scores. In addition, latent changes in N-back and TMT were correlated ( $r = 0.11$ ,  $SE = 0.06$ ,  $z = 1.98$ ,  $p < 0.05$ ). The self-feedback parameter of the stop signal was negative ( $-1.01$ ,  $SE = 0.39$ ,  $z = -2.58$ ,  $p < 0.05$ ), marginal for the TMT ( $-0.43$ ,  $SE = 0.23$ ,  $z = -1.86$ ,  $p = 0.06$ ) and failed to reach significance for the N-back ( $p = 0.28$ ). The analysis of the coupling parameters indicated that adolescents with a greater N-back score (i.e., a lower updating ability) at baseline tended to improve more on the Stop Signal task ( $0.23$ ,  $SE = 0.12$ ,  $z = 1.92$ ,  $p = 0.06$ ). The other coupling parameters did not obtain significance (all  $p$  values  $> 0.21$ ).

In the control training group (AC), there were only marginal latent change intercepts for N-back ( $-0.37$ ,  $SE = 0.22$ ,  $z = -1.66$ ,  $p = 0.10$ ; all other  $p$  values  $> 0.33$ ), thus indicating no significant change in the EF scores after the AC session, except for N-back, which was a marginal change. Latent changes in stop signal and TMT were marginally correlated ( $r = 0.03$ ,  $SE = 0.02$ ,  $z = -0.71$ ,

**IC group**



**AC group**



**Fig. 3.** Estimated parameters for the LCS model in adolescents without equality constraints between groups: IC group (experimental) on top and AC group (control) on bottom. Further results are given in Table 4. I1 = stop signal; U1 = N-back; S1 = TMT; pre = before training; post = after training.

$p = 0.09$ ), thus indicating that increased performance in SST following training was associated with increased performance in TMT following training, and vice versa. As in the children, all of the self-feedback parameters were significantly negative (all  $p$  values  $< 0.01$ ), thus indicating that a lower efficiency on one EF task corresponded to greater gains on that task following training. An analysis of the coupling parameters revealed that individuals with a greater stop signal score at baseline (i.e., a lower IC ability) improved more on N-back following training (1.54, SE = 0.72,  $z = 2.14$ ,  $p < 0.05$ ); similarly, adolescents with a greater N-back score at baseline (i.e., a lower updating ability) improved more on the stop signal (0.15, SE = 0.07,  $z = 2.33$ ,  $p < 0.05$ ). A summary of the analyses can be found in [Table 4](#).

### 3.3.2. LCS model in children with Stroop task as IC measure

Analysis of the *free LCS model* ([Table 5](#)) with the Stroop at pretest in children revealed that TMT was marginally correlated with Nback ( $r = -0.75$ , SE = 0.43,  $z = -1.72$ ,  $p = 0.09$ ).

In the experimental group (IC), the intercept for the latent change score was marginal for the N-back ( $-0.62$ , SE = 0.32,  $z = -1.95$ ,  $p = 0.05$ ; all other  $p$  values  $> 0.32$ ), thus indicating a marginal change in N-back scores after IC training, but not in the TMT or Stroop scores. The self-feedback parameters were significantly negative for the Stroop ( $-0.89$ , SE = 0.14,  $z = -6.48$ ,  $p < 0.001$ ) and TMT ( $-1.12$ , SE = 0.25,  $z = -4.49$ ,  $p < 0.001$ ) tasks and marginal for the N-back task ( $-0.27$ , SE = 0.14,  $z = -1.90$ ,  $p = 0.06$ ), thus indicating that higher initial scores (and thus a lower EF ability) on one EF task corresponded to greater gains on that task. The analysis of the coupling parameters, which indicated crossed effects between gains in one EF and initial performance in the two other EFs, showed that individuals with the larger improvement on the TMT had a higher Stroop score (i.e., a lower IC ability; 25.01, SE = 12.14,  $z = 3.82$ ,  $p < 0.05$ ) and a lower N-back score (i.e., a better updating ability;  $-14.70$ , SE = 7.81,  $z = -1.88$ ,  $p = 0.06$ ) at baseline. Additionally, children with a higher TMT score (i.e., a poorer switching ability) at baseline improved more on the N-back (0.01, SE = 0.00,  $z = 2.58$ ,  $p < 0.05$ ) and on the Stroop (0.01, SE = 0.00,  $z = 3.82$ ,  $p < 0.001$ ) tasks. Finally, the number of training sessions was not significantly related to any of the EF latent changes.

In the control training group (AC), there was no significant intercept for the latent variables related to the EF score changes (all  $p$  values  $> 0.10$ ), thus indicating no significant changes in EF scores after AC training. However, in contrast to the IC group, the latent change scores related to Stroop and to TMT were marginally correlated ( $r = 0.30$ , SE = 0.16,  $z = 1.88$ ,  $p = 0.06$ ), thus suggesting that increased performance in Stroop following training was associated with an increased performance in TMT following training. As in the IC group, all the self-feedback parameters were significantly negative (all  $p$  values  $< 0.01$  except for N-back whose  $p = 0.05$ ). The coupling parameters showed that individuals with the larger improvement on the Nback had a lower Stroop score (i.e., a lower IC ability;  $-0.51$ , SE = 0.28,  $z = -1.81$ ,  $p = 0.07$ ) and a lower TMT score (i.e., a lower switching ability;  $-0.01$ , SE = 0.00,  $z = -1.78$ ,  $p = 0.07$ ) at baseline. Additionally, children with a higher Stroop score (i.e., a poorer IC ability) at baseline improved more on the TMT (24.30, SE = 11.69,  $z = 2.08$ ,  $p < 0.05$ ).

### 3.3.3. LCS model in adolescents with Stroop task as IC measure

The analysis at the pretest of the Stroop free LCS model in adolescents ([Table 5](#)) did not reveal any significant correlation between any of the EF task scores (all  $p$  values  $> 0.11$ ).

In the experimental group (IC), the latent change intercept for the Stroop was marginal (0.08, SE = 0.05,  $z = 1.73$ ,  $p = 0.08$ ; all other  $p$  values  $> 0.47$ ), thus indicating a marginal change in Stroop scores after IC training, but not for the TMT or N-back scores. In addition, latent changes in N-back and TMT were correlated ( $r = 0.10$ , SE = 0.04,  $z = 2.58$ ,  $p < 0.05$ ). The self-feedback parameter was significantly negative for the Stroop ( $-0.88$ , SE = 0.14,  $z = -6.32$ ,  $p < 0.001$ ) and the TMT ( $-0.58$ , SE = 0.21,  $z = -2.79$ ,  $p < 0.01$ ) but failed to reach significance for the N-back ( $p = 0.33$ ). The analysis of the coupling parameters indicated that adolescents with the larger improvement on the TMT had a higher Stroop score (i.e., a lower IC ability; 23.15, SE = 6.75,  $z = 3.43$ ,  $p < 0.01$ ) and a higher N-back score (i.e., a lower updating ability; 19.63, SE = 4.26,  $z = 4.61$ ,  $p < 0.001$ ) at baseline. The other coupling parameters did not reach significance (all  $p$  values  $> 0.28$ ).

In the control training group (AC), there were no significant latent change intercept (all  $p$  values  $> 0.60$ ), thus indicating no significant change in the EF scores after the AC training. Latent changes in Stroop and TMT were positively correlated ( $r = 0.10$ , SE = 0.04,  $z = 2.55$ ,  $p < 0.05$ ), thus indicating that increased performance in Stroop following training was associated with increased performance in TMT following training, and vice versa. All the self-feedback parameters were significantly negative (all  $p$  values  $< 0.001$ ), thus indicating that a lower efficiency on one EF task corresponded to greater gains on that task following training. The analysis of the coupling parameters indicated that individuals with the larger improvement on the TMT had a higher Stroop score (i.e., a lower IC ability; 28.12, SE = 8.31,  $z = 3.38$ ,  $p < 0.001$ ) and a lower N-back score (i.e., a higher updating ability;  $-22.37$ , SE = 8.03,  $z = -2.79$ ,  $p < 0.01$ ) at baseline. A summary of the analyses can be found in [Table 4](#).

## 4. Discussion

This study reported the first multivariate LCS analysis of the effect on EFs of IC training in children and adolescents. When compared to repeated-measures ANOVAs, LCS models allowed us to identify the transfer of IC training on EFs and the modulation of such an effect as a function of individual differences in training receptivity.

Previous studies of transfer following executive training have shown mixed results. Some studies have reported far transfer ([Aydmune et al., 2019](#); [Beauchamp et al., 2016](#); [Jaeggi et al., 2011](#); [Liu et al., 2015](#); [Maraver et al., 2016](#); [Söderqvist & Bergman Nutley, 2015](#)), other studies only near transfer ([Bergman Nutley et al., 2011](#); [Dunning et al., 2013](#); [Zhao et al., 2015](#)) and some studies no effect of the training at all ([Enge & Fleischhauer, 2014](#); [Talanow & Ettinger, 2018](#); [Thorell et al., 2009](#)). Our study, using a new statistical

approach which can model more accurately the theory, could detect both near and far transfer effects following IC training. Hence, the mixed, and sometimes null, results reported in previous studies may be related to the choice of the statistical tools. The use of LCS in executive training therefore open new perspectives for both research and application.

Indeed, although the repeated-measures ANOVAs could only detect near transfer in the IC abilities of children, LCS detected near transfer in IC but also a far transfer effect in the updating abilities of children. The transfer detected in children with LCS is similar to previous IC training studies in children (Aydmune et al., 2019; Liu et al., 2015) and young adults (Beauchamp et al., 2016; Maraver et al., 2016). In adolescents, LCS, but not ANOVAs, detected significant changes in IC abilities after training. Of note, no far transfer effect could be detected in adolescents via ANOVAs or LCS. Such lack of transfer could be related with the EF specialization with age, with decreased EF unity and increased EF diversity, thus leading to decreased common shared EF (Agostino et al., 2010; Friedman et al., 2016; Hartung et al., 2020; Lee et al., 2013; McAuley & White, 2011; Wu et al., 2011; Xu et al., 2013). Indeed, with age, EF structure progresses from a one-factor structure in early childhood with no clear dissociation between EFs (Shing et al., 2010; Wiebe et al., 2008; Willoughby et al., 2012; Xu et al., 2013) to a two- to four-factors structure at adolescence (Agostino et al., 2010; Friedman et al., 2016; Lee et al., 2013; McAuley & White, 2011; Wu et al., 2011; Xu et al., 2013). Hence, although in childhood, updating, switching and IC likely rely on similar underlying cognitive processes, in adolescence, EFs become more specialized and independent. This developmental change in EF organization (for a review: Lee et al., 2013) is supported by a recent brain imaging study reporting an increasing segregation of structural brain network modules with age, and this segregation mediates the effects of age on EF (Baum et al., 2017). Such differentiation of EF organization from childhood to adolescence may also explain the stronger correlations observed in children compared to adolescents between EF tasks at baseline.

The LCS analysis also revealed that children and adolescents with lower initial EF abilities progress more than those individuals with higher initial EF abilities, thus confirming the results of previous studies that training provides greater benefits for children with lower EF (Au et al., 2015; Diamond & Lee, 2011; Jaeggi et al., 2008). Such findings are in line with the ‘compensation account hypothesis’ (Karbach & Unger, 2014).

In addition, transfer effects (as measured by latent changes in updating and switching) depend not only on the initial levels in each of these EFs but also on the initial levels in the other EFs (cross-effects). Such cross-effects are consistent with a previous study on older adults that demonstrated that working memory training led to both a larger training receptivity and marginally to larger transfer effects in planning, IC and fluid intelligence qualities in participants with lower cognitive abilities before training (Zinke et al., 2014). These cross-effects were less important in adolescents than in children. This age difference may be due to a lower training receptivity in adolescents. It may also be a consequence of the separation/specialization of EFs with age. Indeed, cross-effects are likely related to the common shared EF; additionally, as previously mentioned, this common shared EF decreases from childhood to adolescence with EF separation/specialization (Agostino et al., 2010; Friedman et al., 2016; Hartung et al., 2020; Lee et al., 2013; McAuley & White, 2011; Wu et al., 2011; Xu et al., 2013).

Finally, we observed a positive linear dose effect of the number of IC training sessions with the learning gains in updating and switching (but not in IC) in children. This finding is similar to previous studies demonstrating that direct benefits of EF training depend on the duration of training (Diamond, 2016; Jolles & Crone, 2012). Of note, in the present study, the dose effect was only found in nontrained EF tasks (far transfer). The lack of a dose effect in IC tasks may be related to a possible ceiling effect.

Ceiling effect may also contribute to the lack of transfer in adolescent (see Fig. S1 in **Supplementary Materials**, which suggests that (1) adolescents did not progress after the 4th session and (2) the Stroop task used for the IC training was too easy since participants reached the highest level quickly). This ceiling effect could be due, in part, by a decrease in motivation. Similarly, the decrease in performance on the training tasks in children can be explained by a decrease in motivation as well after more than 4 weeks of training. However, we did not have quantitative measure of motivation, but only qualitative assessments (auto-evaluation reports) and could not therefore test this hypothesis. For these reasons, it is not possible to disentangle the possible methodological issues from the developmental effects underlying the lack of transfer observed in adolescents. Of note, the separate analysis of the congruent and incongruent items in the Stroop task (see Fig. S2 in **Supplementary Materials**), revealed that the lack of change in Stroop interference score (RT difference between congruent and incongruent conditions) in the IC and AC groups correspond to different mechanisms: in IC group, RT decrease after training in both congruent and incongruent conditions, while in AC group, RT remain stable after training in both congruent and incongruent conditions.

It should be noted that LCS analyses yielded very similar findings regarding baseline effects, far transfer and crossed-effects using IC measured either by the Stop Signal task or the Stroop task, thus reflecting the robustness of our analyses. The main differences concerns the near transfer since LCS can detect IC change if the Stop Signal is used in the model but no IC change if the Stroop is used. Of note, no Stroop change could be detected with the classical ANOVAs nor the LCS.

Of note, LCS analysis detected changes after AC training. Several reasons may explain such training effects in the control group. First, participants in the AC group followed an active, and not a passive, 5-week training. Second, possible test-retest effects may have occurred. Finally, childhood and adolescence are developmental periods with intensive EF development, we cannot therefore rule out the possibility that the changes detected in the AC group are actually related to normal cognitive development. All these reasons support the use of an active control group to control for these different biases.

The present study had several limitations that warrant caution when interpreting the results. This study reports the first LCS analysis of EF training in children and adolescents. The SEM models uses robust estimates and have good fit, supporting the robustness of our findings. The sample size of the current study is in line with the classical criteria based on model complexity, with 3 – 10 participants per estimated parameter or variable (Bentler & Chou, 1987; Cattell, 1978). Like for all statistical methods, an increase in the sample size would increase the sensibility and specificity of the SEM analyses (Wang & Rhemtulla, 2021). Although statistically significant effects were detected, our findings should be replicated with a large and independent sample. In addition, such a 5-week



longitudinal computerized-training study in children and adolescents is logistically complex to organize. Thus, only IC training could be investigated. Therefore, the training receptivity and transfer effects observed for IC should also be investigated in updating and switching training, which would allow us to evaluate to what extent the reported findings are EF training specific. Another issue of this study is the use of N-back to measure Updating. Indeed, this task is not a pure measure of Updating (Jaeggi et al., 2011; Kane et al., 2007), in particular the IC load increases with the number of lures (Kane et al., 2007). However, it is important to note that N-back task is classically used in the literature (Cohen et al., 1997; Gevins & Cuttillo, 1993; Jaeggi et al., 2010) since it remains a valid indicator of working memory (Schmiedek et al., 2014). Finally, it may be interesting to have different tasks tapping on the same EF, which would enable us to assess the EF change not at the task level but at the level of the EF construct, specifically by using latent variables for each EF. Such direct transposition of the model of Miyake et al. (2000) with latent variables into a longitudinal design would provide key data to investigate the near transfer effects.

In conclusion, our study shows that LCS modeling revealed transfer effects that were not detected with the use of classical univariate analysis of variance applied to the same data. This lower sensitivity of ANOVA may explain the lack of transfer effects that have been reported in EF training studies by using classical statistical approaches (Kassai et al., 2019). Due to its versatility, LCS can assess training transfer both directly (from the estimation of the training-related changes) and indirectly (from the effects of the initial level of each EF on the training-related changes of the other EFs).

### Conflicts of interest

The authors have approved the manuscript and agreed with its submission. These authors declare no conflict of interest.

### Data availability

Data will be made available on request.

### Acknowledgments

The study was supported by a grant from the French National Research Agency (ANR-14-CE30-0014-01 APEX).

### Appendix A. Supporting information

Supplementary data associated with this article can be found in the online version at [doi:10.1016/j.cogdev.2022.101231](https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2022.101231).

### References

- Agostino, A., Johnson, J., & Pascual-Leone, J. (2010). Executive functions underlying multiplicative reasoning: Problem type matters. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105(4), 286–305. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.09.006>
- Aïte, A., Cassotti, M., Linzarini, A., Osmont, A., Houdé, O., & Borst, G. (2018). Adolescents' inhibitory control: Keep it cool or lose control. *Developmental Science*, 21(1), 12491. <https://doi.org/10.1111/desc.12491>
- Ajlchi, B., & Nejati, V. (2017). Executive Functions in Students With Depression, Anxiety, and Stress Symptoms. *Basic and Clinical Neuroscience*, 8(3), 223–232. <https://doi.org/10.18869/nirp.bcn.8.3.223>
- Au, J., Sheehan, E., Tsai, N., Duncan, G. J., Buschkuhl, M., & Jaeggi, S. M. (2015). Improving fluid intelligence with training on working memory: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(2), 366–377. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0699-x>
- Aydunne, Y., Introzzi, I., & Lipina, S. (2019). Inhibitory processes training for school-age children: transfer effects. *Developmental Neuropsychology*, 44(7), 513–542. <https://doi.org/10.1080/87565641.2019.1677667>
- Barch, D. M. (2005). The cognitive neuroscience of schizophrenia. *Annual Review of Clinical Psychology*, 1(1), 321–353. <https://doi.org/10.1146/annurev.clinpsy.1.102803.143959>
- Bates, D., Maechler, M., & Bolker, B. (2012). lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and R syntax. R package version 0.999999-0. URL <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>. R package version 0.999999-0.
- Baum, G. L., Ciric, R., Roalf, D. R., Betzel, R. F., Moore, T. M., Shinohara, R. T., & Satterthwaite, T. D. (2017). Modular segregation of structural brain networks supports the development of executive function in youth. *e8 Current Biology*, 27(11), 1561–1572. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.051>
- Beauchamp, K. G., Kahn, L. E., & Berkman, E. T. (2016). Does inhibitory control training transfer?: Behavioral and neural effects on an untrained emotion regulation task. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11(9), 1374–1382. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw061>
- Benson, J. E., Sabbagh, M. A., Carlson, S. M., & Zelazo, P. D. (2013). Individual differences in executive functioning predict preschoolers' improvement from theory-of-mind training. *Developmental Psychology*, 49(9), 1615–1627. <https://doi.org/10.1037/a0031056>
- Bentler, P. M., & Chou, C.-P. (1987). Practical issues in structural modeling. *Sociological Methods & Research*, 16(1), 78–117. <https://doi.org/10.1177/0049124187016001004>
- Bergman Nutley, S., Söderqvist, S., Bryde, S., Thorell, L. B., Humphreys, K., & Klingberg, T. (2011). Gains in fluid intelligence after training non-verbal reasoning in 4-year-old children: A controlled, randomized study: Fluid intelligence gains after training non-verbal reasoning. *Developmental Science*, 14(3), 591–601. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01022.x>
- 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>
- Biesanz, J. C. (2012). Autoregressive longitudinal models. *Handbook of Structural Equation Modeling* (pp. 459–471). The Guilford Press.
- Bjorklund, D. F., & Harnishfeger, K. K. (1995). The evolution of inhibition mechanisms and their role in human cognition and behavior. In F. N. Dempster, & C. J. Brainerd (Eds.), *Interference and Inhibition in Cognition* (pp. 141–173). Academic Press.
- Blakey, E., & Carroll, D. J. (2015). A short executive function training program improves preschoolers' working memory. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01827>

- Borst, G., Aïte, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development: Evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 57, 21–25. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12688>
- Buschkuhl, M., Jaeggi, S. M., & Jonides, J. (2012). Neuronal effects following working memory training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, S167–S179. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.10.001>
- Casey, B. J., Trainor, R. J., Orendi, J. L., Schubert, A. B., Nystrom, L. E., Giedd, J. N., & Rapoport, J. L. (1997). A Developmental Functional MRI Study of Prefrontal Activation during Performance of a Go-No-Go Task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(6), 835–847. <https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.6.835>
- Cassotti, M., Agouté, M., Camarda, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory control as a core process of creative problem solving and idea generation from childhood to adulthood. *New Directions for Child and Adolescent Development*, 2016(151), 61–72. <https://doi.org/10.1002/cad.20153>
- Castro-Schilo, L., & Grimm, K. J. (2018). Using residualized change versus difference scores for longitudinal research. *Journal of Social and Personal Relationships*, 35(1), 32–58. <https://doi.org/10.1177/0265407517718387>
- Cattell, R. B. (1978). *The Scientific Use of Factor Analysis in Behavioral and Life Sciences*. US: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2262-7>
- Cohen, J. D., Perlstein, W. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Noll, D. C., Jonides, J., & Smith, E. E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386(6625), 604–608. <https://doi.org/10.1038/386604a0>
- 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>
- Craig, F., Margari, F., Legrottaglie, A. R., Palumbi, R., de Giambattista, C., & Margari, L. (2016). A review of executive function deficits in autism spectrum disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 12, 1191–1202. <https://doi.org/10.2147/NDT.S104620>
- Delalande, L., Moyon, M., Tissier, C., Dorriere, V., Guillois, B., Mevell, K., Charron, S., Salvia, E., Poirel, N., Vidal, J., Lion, S., Oppenheim, C., Houdé, O., Cachia, A., & Borst, G. (2020). Complex and subtle structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence. *Developmental Science*, 23(4). <https://doi.org/10.1111/desc.12898>
- Demetriou, E. A., DeMayo, M. M., & Guastella, A. J. (2019). Executive function in autism spectrum disorder: history, theoretical models, empirical findings, and potential as an endophenotype. *Frontiers in Psychiatry*, 10, 753. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2019.00753>
- Demetriou, E. A., Lampit, A., Quintana, D. S., Naismith, S. L., Song, Y. J. C., Pye, J. E., Hickie, I., & Guastella, A. J. (2018). Autism spectrum disorders: A meta-analysis of executive function. *Molecular Psychiatry*, 23(5), 1198–1204. <https://doi.org/10.1038/mp.2017.75>
- Diamond, A. (2011). Biological and social influences on cognitive control processes dependent on prefrontal cortex. *Progress in Brain Research* (pp. 319–339). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53884-0.00032-4>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. (2016). *Why improving and assessing executive functions early in life is critical. In Executive function in preschool-age children: Integrating measurement, neurodevelopment, and translational research* (pp. 11–43). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/14797-002>
- 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, 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>
- Dickson, K. S., Ciesla, J. A., & Zelic, K. (2017). The role of executive functioning in adolescent rumination and depression. *Cognitive Therapy and Research*, 41(1), 62–72. <https://doi.org/10.1007/s10608-016-9802-0>
- Dowsett, S. M., & Livesey, D. J. (2000). The development of inhibitory control in preschool children: Effects of “executive skills” training. *Developmental Psychology*, 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)
- 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., Sexton, H., Duckworth, K., & Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, 43(6), 1428–1446. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>
- Dunning, D. L., Holmes, J., & Gathercole, S. E. (2013). Does working memory training lead to generalized improvements in children with low working memory? A randomized controlled trial. *Developmental Science*, 16(6), 915–925. <https://doi.org/10.1111/desc.12068>
- Enge, S., Behnke, A., Fleischhauer, M., Küttler, L., Kliegel, M., & Strobel, A. (2014). No evidence for true training and transfer effects after inhibitory control training in young healthy adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(4), 987–1001. <https://doi.org/10.1037/a0036165>
- Enge, S., Fleischhauer, M., Lesch, K.-P., Reif, A., & Strobel, A. (2014). Variation in key genes of serotonin and norepinephrine function predicts gamma-band activity during goal-directed attention. *Cerebral Cortex*, 24(5), 1195–1205. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs398>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Altamirano, L. J., Corley, R. P., Young, S. E., Rhea, S. A., & Hewitt, J. K. (2016). Stability and change in executive function abilities from late adolescence to early adulthood: A longitudinal twin study. *Developmental Psychology*, 52(2), 326–340. <https://doi.org/10.1037/dev0000075>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Robinson, J. L., & Hewitt, J. K. (2011). Developmental trajectories in toddlers’ self-restraint predict individual differences in executive functions 14 years later: A behavioral genetic analysis. *Developmental Psychology*, 47(5), 1410–1430. <https://doi.org/10.1037/a0023750>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201–225. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.2.201>
- Fujisawa, K. K., Todo, N., & Ando, J. (2017). Genetic and environmental influences on the development and stability of executive functions in children of preschool age: a longitudinal study of Japanese Twins. *Infant and Child Development*, 26(3). <https://doi.org/10.1002/icd.1994>
- Gevins, A., & Cuttito, B. (1993). Spatiotemporal dynamics of component processes in human working memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 87(3), 128–143. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(93\)90119-G](https://doi.org/10.1016/0013-4694(93)90119-G)
- Gilmore, C., & Cragg, L. (2018). The role of executive function skills in the development of children’s mathematical competencies. In A. Henik, & W. Fias (Eds.), *Heterogeneity of Function in Numerical Cognition* (pp. 263–286). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811529-9.00014-5>
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Exercising your brain: A review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychology and Aging*, 23(4), 692–701. <https://doi.org/10.1037/a0014345>
- Hartung, J., Engelhardt, L. E., Thibodeaux, M. L., Harden, K. P., & Tucker-Drob, E. M. (2020). Developmental transformations in the structure of executive functions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 189, Article 104681. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104681>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(19), 6829–6833. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Shah, P. (2011). Short- and long-term benefits of cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25), 10081–10086. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103228108>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Shah, P., & Jonides, J. (2014). The role of individual differences in cognitive training and transfer. *Memory & Cognition*, 42(3), 464–480. <https://doi.org/10.3758/s13421-013-0364-z>
- Jaeggi, S. M., Studer-Luethi, B., Buschkuhl, M., Su, Y.-F., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2010). The relationship between n-back performance and matrix reasoning—Implications for training and transfer. *Intelligence*, 38(6), 625–635. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2010.09.001>
- Jolles, D. D., & Crone, E. A. (2012). Training the developing brain: A neurocognitive perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00076>
- Kane, M. J., Conway, A. R. A., Miura, T. K., & Colflesh, G. J. H. (2007). Working memory, attention control, and the N-back task: A question of construct validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 615–622. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.3.615>
- Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, 5, 390. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00390>
- Karr, J. E., Areshenkoff, C. N., Rast, P., Hofer, S. M., Iverson, G. L., & Garcia-Barrera, M. A. (2018). The unity and diversity of executive functions: A systematic review and re-analysis of latent variable studies. *Psychological Bulletin*, 144(11), 1147–1185. <https://doi.org/10.1037/bul0000160>

- Kassai, R., Futo, J., Demetrovics, Z., & Takacs, Z. K. (2019). A meta-analysis of the experimental evidence on the near- and far-transfer effects among children's executive function skills. *Psychological Bulletin*, 145(2), 165. <https://doi.org/10.1037/bul0000180>
- Kievit, R. A., Brandmaier, A. M., Ziegler, G., van Harmelen, A.-L., de Mooij, S. M. M., Moutoussis, M., Goodyer, I. M., Bullmore, E., Jones, P. B., Fonagy, P., Lindenberger, U., & Dolan, R. J. (2018). Developmental cognitive neuroscience using latent change score models: A tutorial and applications. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 33, 99–117. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.11.007>
- Kievit, R. A., Lindenberger, U., Goodyer, I. M., Jones, P. B., Fonagy, P., Bullmore, E. T., the Neuroscience in PsychiatryNetwork, & Dolan, R. J. (2017). Mutualistic coupling between vocabulary and reasoning supports cognitive development during late adolescence and early adulthood. *Psychological Science*, 28(10), 1419–1431. <https://doi.org/10.1177/0956797617710785>
- Kim, S., Nordling, J. K., Yoon, J. E., Boldt, L. J., & Kochanska, G. (2013). Effortful control in "hot" and "cool" tasks differentially predicts children's behavior problems and academic performance. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 41(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s10802-012-9661-4>
- Kleibecker, S. W., Koolschijn, P. C. M. P., Jolles, D. D., De Dreu, C. K. W., & Crone, E. A. (2013). The neural coding of creative idea generation across adolescence and early adulthood. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00905>
- Klenberg, L., Närhi, V., Korkman, M., & Hokkanen, L. (2015). Examining methodological variation in response inhibition: The effects of outcome measures and task characteristics on age-related differences. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 21(5), 586–602. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.950215>
- 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>
- Lee, K., Bull, R., & Ho, R. M. H. (2013). Developmental Changes in Executive Functioning. *Child Development*, 84(6), 21.
- Lee, K., Ng, S. F., & Bull, R. (2018). Learning and solving algebra word problems: The roles of relational skills, arithmetic, and executive functioning. *Developmental Psychology*, 54(9), 1758–1772. <https://doi.org/10.1037/dev0000561>
- 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(1), 14200. <https://doi.org/10.1038/srep14200>
- Loughead, J., Wileyto, E. P., Valdez, J. N., Sanborn, P., Tang, K., Strasser, A. A., Ruparel, K., Ray, R., Gur, R. C., & Lerman, C. (2009). Effect of abstinence challenge on brain function and cognition in smokers differs by COMT genotype. *Molecular Psychiatry*, 14(8), 820–826. <https://doi.org/10.1038/mp.2008.132>
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Development*, 75(5), 1357–1372. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00745.x>
- Maraver, M. J., Bajo, M. T., & Gomez-Ariza, C. J. (2016). Training on working memory and inhibitory control in young adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00588>
- Marcovitch, S., O'Brien, M., Calkins, S. D., Leerkes, E. M., Weaver, J. M., & Levine, D. W. (2015). A longitudinal assessment of the relation between executive function and theory of mind at 3, 4, and 5 years. *Cognitive Development*, 33, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2014.07.001>
- McArdle, J. J. (2009). Latent variable modeling of differences and changes with longitudinal data. *Annual Review of Psychology*, 60(1), 577–605. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163612>
- McArdle, J. J., & Hamagami, F. (2001). Latent difference score structural models for linear dynamic analyses with incomplete longitudinal data. In L. M. Collins, & A. G. Sayer (Eds.), *New Methods for the Analysis of Change* (pp. 139–175). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/10409-005>
- McAuley, T., & White, D. A. (2011). A latent variables examination of processing speed, response inhibition, and working memory during typical development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 453–468. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.009>
- 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>
- Miller, H. V., Barnes, J. C., & Beaver, K. M. (2011). Self-control and health outcomes in a nationally representative sample. *American Journal of Health Behavior*, 35(1), 15–27. <https://doi.org/10.5993/ajhb.35.1.2>
- Millner, A. J., Jaroszewski, A. C., Chamarthi, H., & Pizzagalli, D. A. (2012). Behavioral and electrophysiological correlates of training-induced cognitive control improvements. *NeuroImage*, 63(2), 742–753. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.07.032>
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1), 8–14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Morrison, A. B., & Chein, J. M. (2011). Does working memory training work? The promise and challenges of enhancing cognition by training working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(1), 46–60. <https://doi.org/10.3758/s13423-010-0034-0>
- Mund, M., & Nestler, S. (2019). Beyond the cross-lagged panel model: next-generation statistical tools for analyzing interdependencies across the life course. *Advances in Life Course Research*, 41, 24.
- Noack, H., Lövdén, M., & Schmiedek, F. (2014). On the validity and generality of transfer effects in cognitive training research. *Psychological Research*, 78(6), 773–789. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0564-6>
- von Oertzen, T., Brandmaier, A. M., & Tsang, S. (2015). Structural Equation Modeling With  $\Omega$ yx. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 22(1), 148–161. <https://doi.org/10.1080/10705511.2014.935842>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Pan, J., Sawyer, K., McDonough, E., Slotpole, L., & Gansler, D. (2018). Cognitive, Neuroanatomical, and Genetic Predictors of Executive Function in Healthy Children and Adolescents. *Developmental Neuropsychology*, 43(7), 535–550. <https://doi.org/10.1080/87565641.2018.1516770>
- Paulsen, D. J., Hallquist, M. N., Geier, C. F., & Luna, B. (2015). Effects of incentives, age, and behavior on brain activation during inhibitory control: A longitudinal fMRI study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 11, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.09.003>
- Richland, L. E., & Burchinal, M. R. (2013). Early executive function predicts reasoning development. *Psychological Science*, 24(1), 87–92. <https://doi.org/10.1177/0956797612450883>
- Rosseel, Y. (2012). **lavaan**: an R package for structural equation modeling. *Journal of Statistical Software*, 48(2). <https://doi.org/10.18637/jss.v048.i02>
- Rubia, K., Lim, L., Ecker, C., Halari, R., Giampietro, V., Simmons, A., Brammer, M., & Smith, A. (2013). Effects of age and gender on neural networks of motor response inhibition: From adolescence to mid adulthood. *NeuroImage*, 83, 690–703. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.078>
- 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>
- Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., & Müller, H. (2003). Evaluating the fit of structural equation models: tests of significance and descriptive goodness-of-fit measures. *Methods of Psychological Research*, 8(2), 23–74.
- Schmiedek, F., Lövdén, M., & Lindenberger, U. (2014). A task is a task is a task: Putting complex span, n-back, and other working memory indicators in psychometric context. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01475>
- Shing, Y. L., Lindenberger, U., Diamond, A., Li, S.-C., & Davidson, M. C. (2010). Memory maintenance and inhibitory control differentiate from early childhood to adolescence. *Developmental Neuropsychology*, 35(6), 679–697. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.508546>
- Simons, D. J., Boot, W. R., Charness, N., Gathercole, S. E., Chabris, C. F., Hambrick, D. Z., & Stine-Morrow, E. A. L. (2016). Do "Brain-Training" Programs Work? *Psychological Science in the Public Interest*, 17(3), 103–186. <https://doi.org/10.1177/1529100616661983>
- Söderqvist, S., & Bergman Nutley, S. (2015). Working memory training is associated with long term attainments in math and reading. *Frontiers in Psychology*, 6, 1711. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01711>
- Spieler, L., Chavan, C. F., & Manuel, A. L. (2013). Training-induced behavioral and brain plasticity in inhibitory control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 427. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00427>

- Steyer, R., Eid, M., & Schwenkmezger, P. (1997). Modeling true intraindividual change: True change as a latent variable. *Methods of Psychological Research*, 2(1), 21–33.
- Talanow, T., & Ettinger, U. (2018). Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control training in healthy adults. *Acta Psychologica*, 187, 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.04.016>
- Tamm, L., Menon, V., & Reiss, A. L. (2002). Maturation of Brain Function Associated With Response Inhibition. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 8.
- Tennant, P.W.G., Arnold, K.F., Ellison, G.T.H., & Gilthorpe, M.S., 2019, Analyses of " change scores " do not estimate causal effects in observational data. arXiv: 1907.02764 [stat]. (<http://arxiv.org/abs/1907.02764>).
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science*, 12(1), 106–113. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x>
- Traut, H. J., Guild, R. M., & Munakata, Y. (2021). Why does cognitive training yield inconsistent benefits? A meta-analysis of individual differences in baseline cognitive abilities and training outcomes. *Frontiers in Psychology*, 12, 1697. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.662139>
- Traverso, L., Viterbori, P., & Usai, M. C. (2019). Effectiveness of an executive function training in italian preschool educational services and far transfer effects to pre-academic skills. *Frontiers in Psychology*, 10, 2053. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02053>
- Verbruggen, F., Aron, A. R., Band, G. P., Beste, C., Bissett, P. G., Brockett, A. T., Brown, J. W., Chamberlain, S. R., Chambers, C. D., Colnius, H., Colzato, L. S., Comeil, B. D., Coxon, J. P., Dupuis, A., Eagle, D. M., Garavan, H., Greenhouse, I., Heathcote, A., Huster, R. J., ... Boehler, C. N. (2019). A consensus guide to capturing the ability to inhibit actions and impulsive behaviors in the stop-signal task. *eLife*, 8, Article e46323. <https://doi.org/10.7554/eLife.46323>
- Wang, Y. A., & Rhemtulla, M. (2021). Power analysis for parameter estimation in structural equation modeling: a discussion and tutorial. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 4(1). <https://doi.org/10.1177/2515245920918253>
- 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>
- Willoughby, M. T., Wirth, R. J., Blair, C. B., & Family Life Project Investigators. (2012). Executive function in early childhood: Longitudinal measurement invariance and developmental change. *Psychological Assessment*, 24(2), 418–431. <https://doi.org/10.1037/a0025779>
- Wu, K. K., Chan, S. K., Leung, P. W. L., Liu, W.-S., Leung, F. L. T., & Ng, R. (2011). Components and developmental differences of executive functioning for school-aged children. *Developmental Neuropsychology*, 36(3), 319–337. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549979>
- Wujcik, R., Nowak, M., & Nęcka, E. (2017). Enhancement of executive control through short-term cognitive training: far-transfer effects on general fluid intelligence. *Polish Psychological Bulletin*, 48(1), 72–78. <https://doi.org/10.1515/ppb-2017-0009>
- Xu, F., Han, Y., Sabbagh, M. A., Wang, T., Ren, X., & Li, C. (2013). Developmental differences in the structure of executive function in middle childhood and adolescence. *PLoS ONE*, 8(10), Article e77770. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077770>
- Xu, P., Wu, D., Chen, Y., Wang, Z., & Xiao, W. (2020). The effect of response inhibition training on risky decision-making task performance. *Frontiers in Psychology*, 11, 1806. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01806>
- Yeo, A. J., O'Rourke, E. J., Halpern, L. F., & Bettcher, J. (2021). The mediated moderation model of depressive symptoms, alcohol use, and consequences: the protective role of executive function. *Substance Use & Misuse*, 56(11), 1651–1661. <https://doi.org/10.1080/10826084.2021.1949605>
- Zhang, H., Li, J., Yang, B., Ji, T., Long, Z., Xing, Q., & Cao, F. (2018). The divergent impact of catechol-O-methyltransferase (COMT) Val 158 Met genetic polymorphisms on executive function in adolescents with discrete patterns of childhood adversity. *Comprehensive Psychiatry*, 81, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.comppsy.2017.11.004>
- Zhao, X., Chen, L., Fu, L., & Maes, J. H. R. (2015). "Wesley says": A children's response inhibition playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Frontiers in Psychology*, 6, 7.
- Zinke, K., Zeintl, M., Rose, N. S., Putzmann, J., Pydde, A., & Kliegel, M. (2014). Working memory training and transfer in older adults: Effects of age, baseline performance, and training gains. *Developmental Psychology*, 50(1), 304–315. <https://doi.org/10.1037/a0032982>



OPEN

# A network analysis of executive functions before and after computerized cognitive training in children and adolescents

Iris Menu<sup>1</sup>, Gabriela Rezende<sup>1</sup>, Lorna Le Stanc<sup>1</sup>, Grégoire Borst<sup>1,2,4</sup> & Arnaud Cachia<sup>1,3,4</sup>✉

Executive functions (EFs) play a key role in cognitive and socioemotional development. Factor analyses have revealed an age dependent structure of EFs spanning from a single common factor in early childhood to three factors in adults corresponding to inhibitory control (IC), switching and updating. IC performances change not only with age but also with cognitive training. Surprisingly, few studies have investigated training-related changes in EFs structure. We used the regularized partial correlation network model to analyze EFs structure in 137 typically developing children (9–10 years) and adolescents (15–17 years) before and after computerized cognitive training. Network models (NMs)—a graph theory-based approach allowing us to describe the structure of complex systems—can provide a priori free insight into EFs structures. We tested the hypothesis that training-related changes may mimic developmental-related changes. Quantitative and qualitative changes were detected in the EFs network structure with age and also with cognitive training. Of note, the EFs network structure in children after training was more similar to adolescents' networks than before training. This study provided the first evidence of structural changes in EFs that are age and training-dependent and supports the hypothesis that training could accelerate the development of some structural aspects of EFs. Due to the sample size, these findings should be considered preliminary before replication in independent larger samples.

Executive functions (EFs) are a set of high-level cognitive functions that allow an individual to intentionally regulate his or her thinking and act to achieve goals<sup>1</sup>. Three EFs are commonly distinguished: inhibitory control, working memory or updating, and cognitive flexibility or switching<sup>2</sup>. These functions are necessary for the development of more complex skills such as reasoning<sup>3</sup>, theory of mind<sup>4–6</sup>, arithmetic<sup>7–9</sup>, decision-making<sup>10</sup> and creativity<sup>11,12</sup>. EF abilities improve with age<sup>13–19</sup> under strong genetic and environmental influences<sup>2,20–23</sup>.

Studies of individual differences in EFs indicate that performance on tasks designed to tap a specific EF domain (e.g., inhibitory control) is correlated with but also separable from, performance on tasks tapping other EF domains (e.g., switching)<sup>24</sup>. Moreover, although scores on various EF tasks are often positively correlated with each other, these correlations are often not higher than those between EF and non-EF tasks. In this context, studies have investigated the structure of these functions to determine the extent to which (a) they reflect distinct or common abilities and (b) these abilities become more specific with age. Using structural equation modeling (SEM), Miyake et al.<sup>1</sup> proposed a hierarchical structure of EFs, with three latent factors representing each EF domain. In adults, these latent factors are separable (EF diversity), although they share a significant proportion of variances (EF unity, or common-EF ability)<sup>20</sup>. The EF structure evolves from a one-factor structure in early childhood with no clear separation among EF tasks<sup>25–28</sup> to a two- to four-factor structure in adolescence<sup>15,21,28–31</sup>. Of note, some studies also report an organization with more than one factor in young children<sup>31</sup> and fewer than three factors in older children<sup>32</sup>. A recent meta-analysis<sup>33</sup> tested seven models of EF structure and found some evidence for greater unidimensionality of EFs among child/adolescent samples and both unity and diversity

<sup>1</sup>Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation, UMR CNRS 8240, Université Paris Cité, Paris, France. <sup>2</sup>Institut Universitaire de France, Paris, France. <sup>3</sup>Imaging Biomarkers for Brain Development and Disorders, UMR INSERM 1266, GHU Paris psychiatrie & neurosciences, Université Paris Cité, 75005 Paris, France. <sup>4</sup>These authors contributed equally: Grégoire Borst and Arnaud Cachia. ✉email: arnaud.cachia@u-paris.fr

among adult samples. The developmental organization of EFs<sup>15</sup> is supported by a recent brain imaging study reporting an increasing segregation of structural brain network modules with age, and this segregation mediates the effects of age on EFs<sup>34</sup>. In addition, a recent behavioral study on children from 7 to 15 years<sup>24</sup> found that age mostly impacts the common EF loadings of inhibitory control and switching. Hence, while in childhood, updating, switching and inhibitory control likely rely on similar underlying cognitive processes, in adolescence, EFs become more specialized and independent.

Because EFs are implicated in learning, academic achievement, psychiatric health, and everyday functioning<sup>2,35</sup>, several intervention programs have tested the possibility of stimulating various aspects of EFs, including working memory<sup>36,37</sup> and inhibitory control (hereafter referred to as IC)<sup>2,10,38–41</sup>. These studies, conducted in children, adolescents, and young adults, have shown that it is possible to train EFs and have raised the question of the duration of the effects of training<sup>39</sup> as well as the possibility of transferring the effects of training an EF to other executive or cognitive domains<sup>10,39–41</sup>. Indeed, most training studies aimed to determine to what extent executive control training and IC training in particular transfer to untrained tasks within the same domain or EF (i.e., near transfer) or in other domains or functions (i.e., far transfer). While some studies reported near and far transfer effect in preschoolers (for near transfer: Zhao et al.<sup>41</sup> and for far transfer: Liu et al.<sup>40</sup>; Rueda et al.<sup>42</sup>) other studies have shown no near or far transfer effects of IC training<sup>43–45</sup>. Importantly, to date no EF training studies have assessed the extent to which EF training changes the structure of EFs.

Another way to understand EF organization and how it changes with age is to use network modeling (NM), a graph theory based-approach allowing us to describe the structure of complex systems<sup>46</sup>. The underlying principle of NM is that systems can be represented as nodes that are interconnected with edges (the thicker the edges are, the stronger the interconnection). The complete graph (nodes and edges) summarizes the pattern of relations among the elements<sup>47</sup>. While in SEM, shared variance of observed variables (e.g., scores on cognitive tasks) is assumed to reflect a latent construct (e.g. inhibitory control or working memory), in NM, shared variance is assumed to reflect a causal network<sup>48</sup>.

NM applied to EFs allows us to identify which nodes (here, a specific EF task) play a pivotal role within the whole network (here, different EF tasks). In addition, NM has the potential to test theoretical models on how EF structures transform with age and more specifically which components can become more central to general executive processing and, therefore, have a greater influence on other EF processes with age. Using NM on a twin cohort aged 7 to 15 years of age, Hartung et al.<sup>24</sup> found that the interconnections between EF tasks remained stable with age except for the inhibition tasks, whose shared variance with the other EF tasks was reduced with age. These findings provided convergent evidence that IC is particularly important for allowing young children to employ other EFs in pursuit of goals but plays a lesser role in regulating other EFs later in development<sup>32,35,49</sup>. NM can also provide interesting insights into the effects of training on the structure of cognitive functions. To date, only one study has used NM to treat such effects in young adults<sup>50</sup>. The study showed that the interconnections between 25 variables related to mindfulness, compassion, psychological well-being, psychological distress and emotional-cognitive control changed after a mindfulness-based stress reduction (MBSR) program.

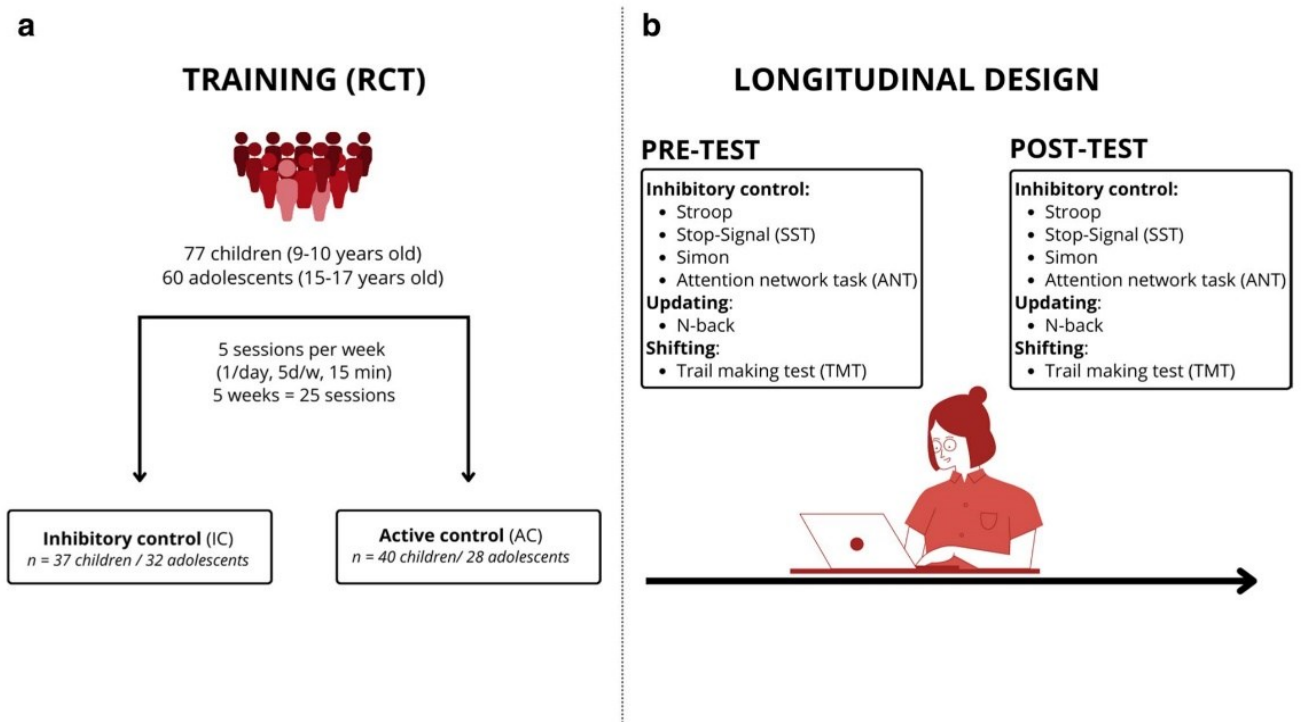
In the present study, we investigated how the structure of EFs was affected by training EFs in children and in adolescents using NM. By using such an approach, we aimed to determine whether training speeds up the development of EFs or qualitatively changes the development of EFs by deviating from the developmental trajectory typically observed from childhood to adolescence<sup>51</sup>. To this end, we assessed EFs in 77 children (9–10 years) and 60 adolescents (16–17 years) before and after 5 weeks of computerized training. Children and adolescents were randomly assigned to an IC training group or an active control group (Fig. 1). We reasoned that if training IC speeds up the development of IC, then training-related changes should mimic developmental-related changes, namely, the structure of EFs in children after IC training but not after control training should be more similar to the structure of EFs in adolescence than before training. On the other hand, if training IC changes the developmental trajectories of IC, then the structure of EFs in children after IC training should differ from that before training (but not after control training) and from the structure of EFs in adolescence. This study, which is preliminary given the sample size, will allow testing these hypotheses before replication in an independent sample.

## Results

We investigated the effects of development and cognitive training on EFs using a 6-node network with 4 measures tapping on different aspects of IC (Stroop on interference control, Stop Signal and Simon on response inhibition and Attentional Network Task or ANT on attentional inhibition), 1 measure of switching (Trail making test or TMT) and 1 measure of updating (N-back) was constructed and estimated.

**Developmental analysis: children vs. adolescents at pretest (before training).** We first studied the EF structure in children and adolescents from the analysis of the EF networks at pretest before training (see Figs. 2 and 3). Visual inspections indicated that networks in adolescents present more and stronger connections than in children.

This visual inspection was followed by a quantitative analysis of the network topology using classical graph indices (see Figs. 2 and 3). The different indices were similar in children and adolescents. Three common centrality measures were used to quantitatively characterize the network at node levels<sup>52</sup>: strength (a measure of how strongly a node is directly connected with the network), betweenness centrality (a measure of how a node is central in connecting other variables) and closeness centrality (a measure of how strongly a node is connected indirectly with the network). Higher closeness centrality indicates that a node (task) is more related, even indirectly, to other nodes (tasks). Higher strength indicates that a node(task) is more strongly connected to other nodes (tasks). Because these indices are calculated based on the absolute values of edge-weights and may therefore miss information on the network structure if negative relationships between nodes are present<sup>53</sup>, two



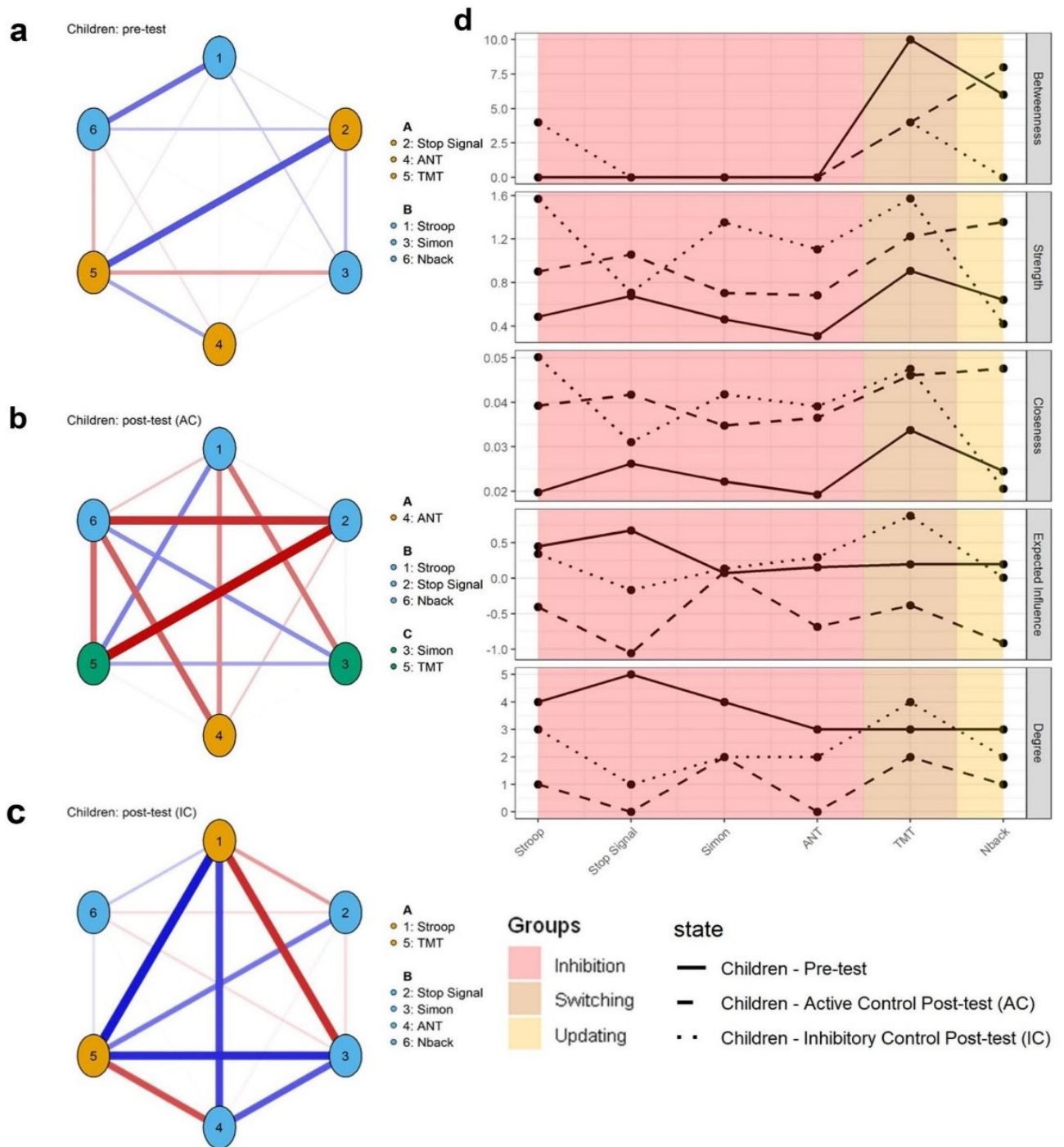
**Figure 1.** Experiment design. **(a)** 77 children (9–10 y.o.) and 60 adolescents (15–17 y.o.) were asked to perform inhibitory control tasks (IC group) or knowledge- and vocabulary-based tasks (Active Control (AC) group) 15 min per day, 5 days a week for 5 weeks (25 sessions) on a tactile tablet. Participants were randomly assigned to the IC or the AC groups as in a Randomized Controlled Trial (RCT). The AC condition allowed to control for test–retest effects. In both IC and AC training, the difficulty was progressively increased and adapted in real time to the learning curve of each participant to maintain the motivation of the participant and to prevent automaticity. **(b)** Participants performed a cognitive battery in the pre- and post-training sessions (longitudinal design) measuring different facets of executive functions: cognitive flexibility/switching (TMT), working memory updating (N-back task), and inhibitory control (Stroop task for interference control, Stop Signal and Simon tasks for response inhibition and ANT for attentional inhibition).

other centrality measures were also used: expected influence (EI), which is the sum of both positive and negative weights between a node and all the other nodes in the network, and degree, which is the number of connections for each node in the network, thus defining hubs (nodes with highest degree). In both children and adolescents, the variables with the highest betweenness were also the variables with the highest strength, closeness and EI. However, such central variables varied with age: in children, the most central nodes included the Stroop, Stop Signal and TMT while in adolescents, they included the ANT and TMT. In children, a high number of relations (i.e., high degree) was generally accompanied by low weights (i.e., low EI and strength).

In adolescents, analysis of hubs revealed homogeneous results, with similar weights over the four indices. Overall, these indices were slightly lower in children than in adolescents, reflecting a less connected network in 9–10-year-old children than in 16–17-year-old children.

We then analyzed the communities. A community corresponds to a set of nodes that cluster more strongly among each other than with other nodes in the network; such communities reflect high mutual influences among nodes in a given cluster. The community analysis detected two clusters in each age group's network (Figs. 2 and 3A–C). In children, the two clusters were as follows: (1) Cluster A (in orange), which included 3 nodes corresponding to executive functioning (Stop Signal, ANT and TMT); (2) Cluster B (in blue), which included 3 nodes corresponding to IC and updating (Stroop, Simon and Nback). In adolescents, the two clusters were as follows: (1) Cluster A (in orange), including 3 nodes corresponding to executive functioning (Simon, TMT and Nback); (2) Cluster B (in blue), including 3 nodes corresponding to IC (Stroop, Stop Signal and ANT). The only difference between children and adolescents' networks was the cluster switch of Stroop and TMT. Finally, the negative correlation between edge weights across networks ( $r = -0.51$ ) reflected the differences previously observed in network connectivity.

**Training effects: pretest vs. posttest.** The changes in EF structure were first investigated using classical univariate repeated-measures ANOVAs applied to the two age groups and the two training groups separately (Table 1 and Fig. 4). These analyses detected a significant change in the Stop Signal ( $p < 0.05$ ) and Stroop ( $p < 0.05$ ) along with a marginal change in TMT ( $p = 0.09$ ) for children after IC training. In adolescents, a significant change in the Stop Signal was detected following AC training ( $p < 0.05$ ). All the other analyses failed to reach significance (all  $p$  values  $> 0.14$ ).

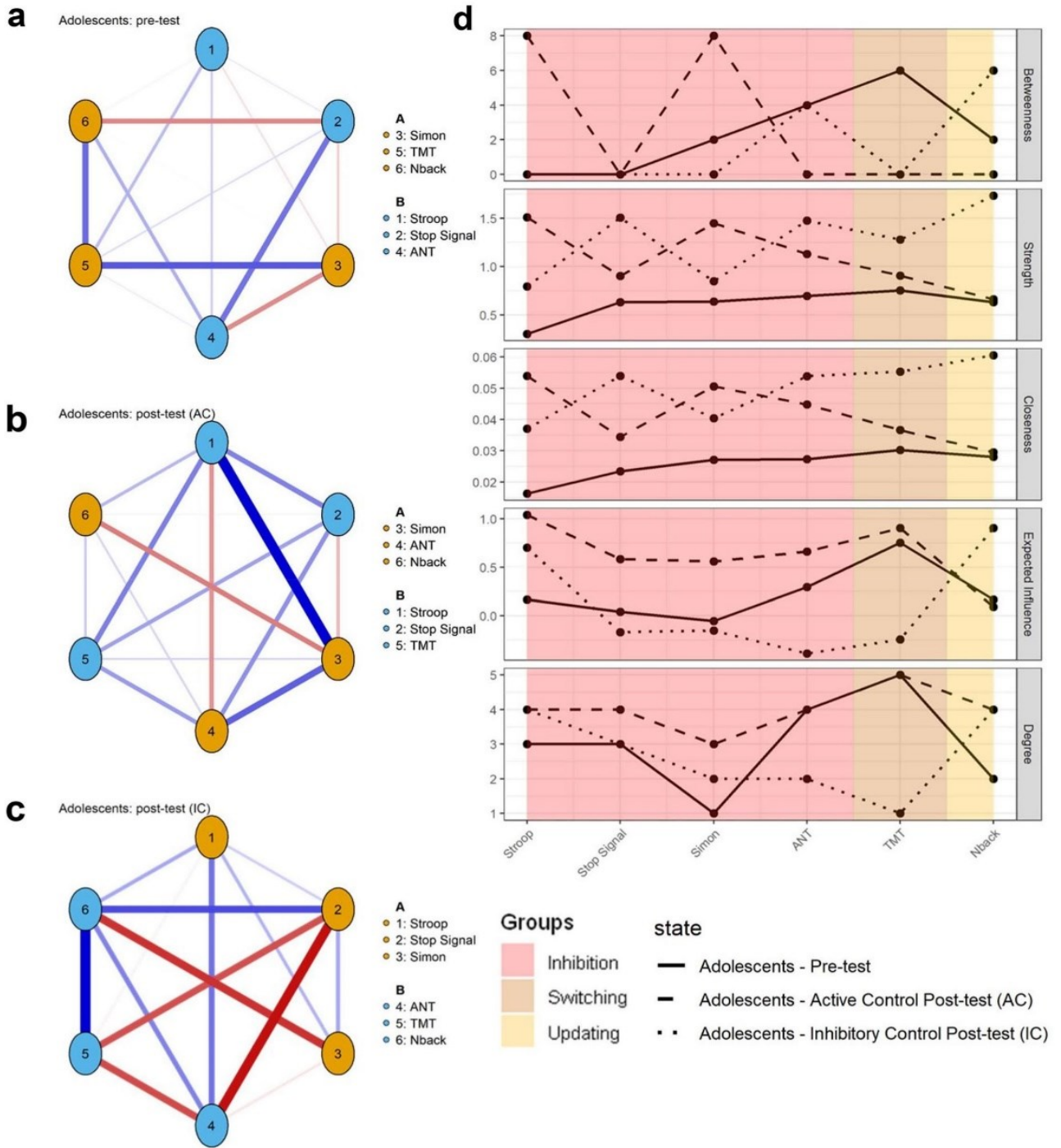


**Figure 2.** Six-nodes networks for children, before (a), after active control training (AC group; b) and after inhibitory control (IC group; c) training with the corresponding centrality indices (d). Color of nodes correspond to the communities. Each number in the networks corresponds to an EF task (see details in the legend).

Complementary analyses, including age and training groups as factors in order to investigate possible age- and training-specific effects, only revealed significant main effects of the age group for SST ( $p = 1.3 \times 10^{-5}$ ) and for TMT ( $p = 0.01$ ) but no interaction effects involving the age nor the training group (all  $p$ s  $> 0.27$ ; see details of the analyses in Table S1). Post-hoc analyses, with Tukey correction for multiple testing, revealed significant pre-post changes in children in IC group for SST ( $p = 0.009$ ) and TMT ( $p = 0.03$ ).

Of note, Welch Two Sample t-tests revealed no significant differences between the two training groups at pretest except for TMT in adolescents ( $t(39.39) = -2.16, p < 0.05$ ) where adolescents affected to the IC training





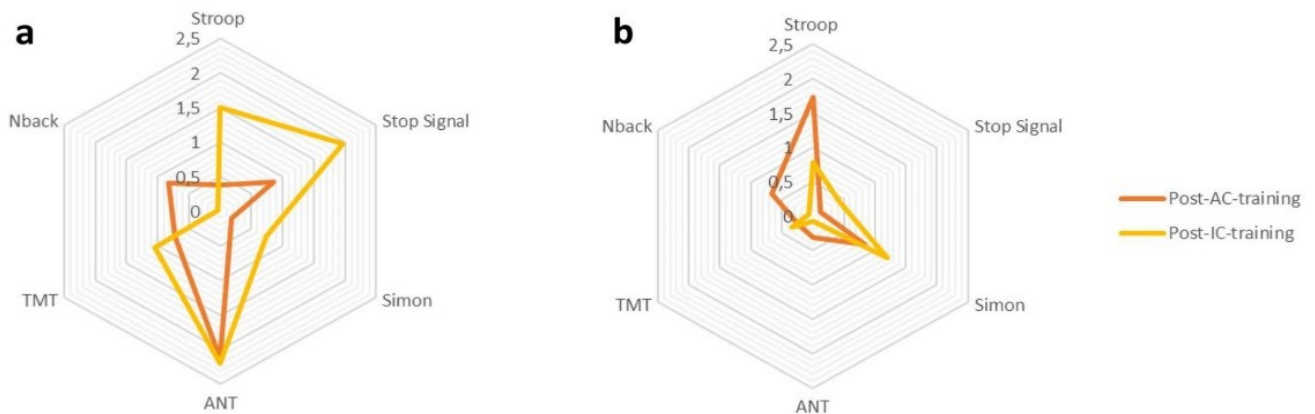
**Figure 3.** Six-nodes networks for adolescents, before (a), after active control training (AC group; b) and after inhibitory control (IC group; c) training with the corresponding centrality indices (d). Color of nodes correspond to the communities. Each number in the networks corresponds to an EF task (see details in the legend).

showed lower score ( $6.87 \pm 3.63$ ) than those who were affected to the AC training ( $9.62 \pm 4.73$ ). All other  $p$ s  $> 0.17$ . See details of raw pretraining and posttraining scores for the three EF tasks in Table 1 and in the radar-plots representing the relative changes after the two types of training in Fig. 4.

These standard analyses were further investigated by comparing the network structure in the pretest and posttest for children (Figs. 2 and 5) and adolescents (Figs. 3 and 5).

	Children				Adolescents			
	Pre IC-training	Pre AC-training	Post IC-training	Post AC-training	Pre IC-training	Pre AC-training	Post IC-training	Post AC-training
	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD
SST	0.26 $\pm$ 0.08	0.25 $\pm$ 0.08	<b>0.21 <math>\pm</math> 0.06*</b>	0.23 $\pm$ 0.08	0.16 $\pm$ 0.03	0.16 $\pm$ 0.03	0.15 $\pm$ 0.04	0.16 $\pm$ 0.03
Stroop	0.11 $\pm$ 0.16	0.13 $\pm$ 0.15	<b>0.06 <math>\pm</math> 0.10*</b>	0.08 $\pm$ 0.16	0.07 $\pm$ 0.09	0.09 $\pm$ 0.08	0.04 $\pm$ 0.05	<b>0.06 <math>\pm</math> 0.07*</b>
Simon	0.04 $\pm$ 0.03	0.04 $\pm$ 0.03	0.03 $\pm$ 0.03	0.03 $\pm$ 0.04	0.08 $\pm$ 0.05	0.08 $\pm$ 0.06	<b>0.02 <math>\pm</math> 0.02<math>\circ</math></b>	0.02 $\pm$ 0.02
ANT	0.04 $\pm$ 0.03	0.03 $\pm$ 0.03	<b>0.06 <math>\pm</math> 0.04**</b>	<b>0.05 <math>\pm</math> 0.04**</b>	0.04 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.02	0.04 $\pm$ 0.02	0.04 $\pm$ 0.03
TMT	22.14 $\pm$ 12.01	18.18 $\pm$ 10.04	<b>16.40 <math>\pm</math> 9.07<math>\circ</math></b>	15.03 $\pm$ 6.66	6.87 $\pm$ 3.63	9.62 $\pm$ 4.73	7.83 $\pm$ 4.33	8.71 $\pm$ 4.15
N-back	0.09 $\pm$ 0.23	0.10 $\pm$ 0.20	0.06 $\pm$ 0.23	0.12 $\pm$ 0.24	0.04 $\pm$ 0.07	0.06 $\pm$ 0.08	0.07 $\pm$ 0.11	0.09 $\pm$ 0.11

**Table 1.** Efficiency of EFs in children and adolescents before and after an active control (AC) or an inhibitory control (IC) training. For all tasks, scores were derived from RTs (in s). *SST* stop signal task, *TMT* trail making test. Training-related changes in task efficiency were evaluated with repeated measures ANOVAs. Significance levels:  $\circ$  < 0.10; \* < 0.05; \*\* < 0.01; \*\*\* < 0.001.



**Figure 4.** Relative changes in EF tasks after cognitive training in children (a) and adolescents (b). The radar graphs represent relative changes after inhibitory control (IC, in yellow) and active control (AC, in orange) training. Values correspond to  $-\log(p)$ , with  $p$  being the main effect of training in the repeated measures ANOVAs presented in Table 1.

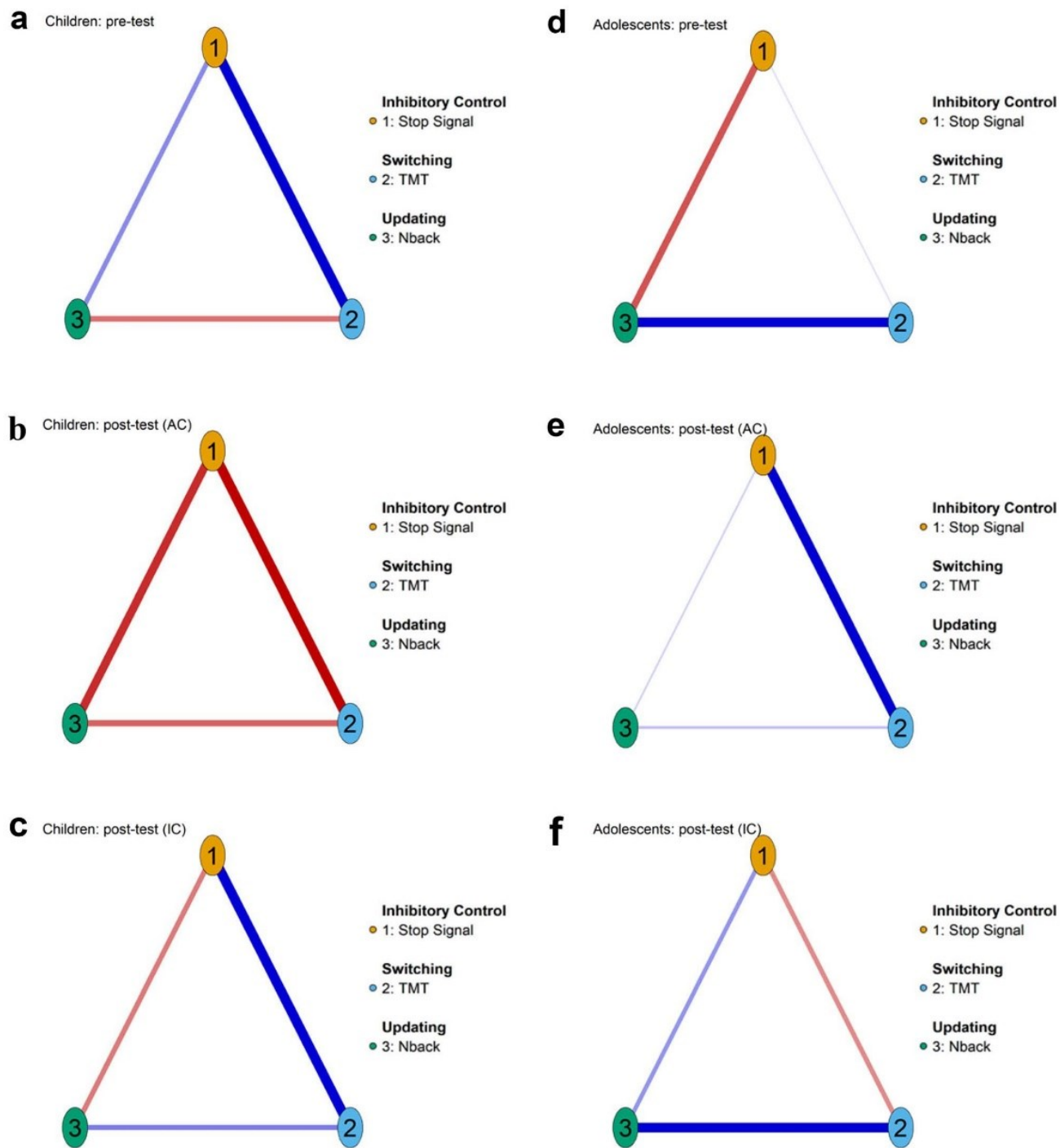
**Cognitive training in children.** The children's 6-nodes-network had a different organization, with denser, more numerous and stronger connections after training compared to pretest, especially after the IC training. Almost all variables showed increasing strength (except for the Stop Signal task) and closeness (Fig. 2B). Stroop and TMT remained the most central nodes of the network after IC training. After AC training, most of the variables increased in strength and closeness, and N-back became the most central node in the network along with TMT. The centrality indices revealed poor connections at pretest in children (strength < 1 and closeness < 0.03) while at posttest, strength and closeness increased, but differently after AC and IC training.

The community analysis (Fig. 2) detected two communities both pretest and after IC training and three communities after an AC training. After AC training, the three clusters were as follows: (1) Cluster A (in orange), including only ANT; Cluster B (in blue), including Stroop, Stop Signal and N-back and Cluster C (in green), including Simon and TMT. After IC training, the two clusters were: (1) Cluster 1 (in orange), including Stroop and TMT and Cluster B (in blue), including Stop Signal, Simon, ANT and Nback.

Correlations between edge weights across networks were low both after AC ( $r_{AC} = -0.30$ ) and IC ( $r_{IC} = -0.23$ ) training indicating few similarities between networks before and after training.

**Cognitive training in adolescents.** In adolescents (Fig. 3), the differences in network structure between pretest and after IC training are less important than in children (see Fig. 3a–c). Nevertheless, after IC training, almost all variables except Simon increased in strength and closeness. Analysis of EI and Degree highlights the centrality of Stroop and Nback, which have the highest scores in these indices. After AC training, fewer changes occurred with an increase in Stop Signal and Simon for both Strength and Closeness. However, these changes were less important than those after IC training.

Community analysis revealed small cluster changes after training, with two nodes being switched after AC training (TMT and ANT) and after IC training (ANT and Simon; see details in Fig. 3). As for centrality indices, changes in communities were less important in adolescents than in children.



**Figure 5.** Three-nodes networks for children (a–c) and adolescents (d–f), before (a,d), after active control training (AC; b,e) and after inhibitory control (IC; c,f) training. Color of nodes correspond to an executive function. Each number in the networks corresponds to an EF task (see details in the legend).

Correlations between edge weights across networks between pretest and posttest were low in both AC ( $r_{AC} = -0.08$ ) and IC training ( $r_{IC} = -0.11$ ), supporting very few similarities between networks before and after training.

In addition to the 6-node networks, a complementary analysis of balanced 3-node networks, where each node represented an EF (Stop Signal for IC, TMT for switching and N-back for updating; Fig. 5), was performed. The Stop Signal, the IC task with the most significant progression after training (see pre-post changes in Table 1), was selected as IC measure. This analysis provided similar results to the previous analysis obtained with the 6-node network, namely greater network connections in childhood than in adolescence and similar network changes related to training and to development.

## Discussion

In this study, we report the first NM analysis of EF structure changes with age and cognitive training. Based on the hypothesis that training mimics development and can therefore accelerate cognitive changes with age, we anticipated a switch from a centralized to a distributed EF network from childhood to adolescence<sup>1,34</sup> as well as in children after IC but not AC training.

Quantitative and qualitative differences were detected in the EF network structure between children (9–10 years) and adolescents (16–17 years). The increased connections with age between children's and adolescents' networks between tasks tapping different EF domains support the previously reported increasing shared variance among EF variables during development<sup>28</sup>. This increased number of connections was confirmed by an increased overall centrality in adolescents compared to children. These findings are also consistent with a study on the development of EF structures from 7 to 15 years of age reporting increased centrality indices (closeness and strength) for EF tasks after 13 years of age<sup>24</sup>. Our results also support a recent cross-sectional study using network analysis to examine changes in EF organization from 3 to 85 years of age<sup>54</sup>. This study reported an increase in inter-EF connections (increasing strength and expected influence) from 15.5 years of age<sup>54</sup>, consistently with our findings. However, this study also demonstrated that this increase was preceded by a decrease in the centrality indices from early childhood. Our two age groups are thus just around the point of inversion, it might thus be interesting in the future to extend our analyses with participants just at the point of inversion. Moreover, an accelerated longitudinal design study also suggested organizational changes between ages 8 and 14, along with change for each age group within a single year<sup>55</sup>. Thus, it might be relevant to narrow the age range in order to investigate finer developmental changes. Analysis of centrality also revealed that Stroop, Stop Signal and TMT—the first two on IC and the last one on switching—are central in the EF network of children. This is consistent with previous studies that reported that IC is central for children to employ other EFs<sup>32,35,49</sup>. However, according to these studies, with age and EF development, IC becomes less central, while in adolescence and adulthood, working memory increases its role in regulating EFs<sup>32,35,49</sup>. We thus expected N-back to be the most central node in adolescents. Instead, TMT and ANT—tapping on switching and attentional IC—were the central nodes of the network. Nevertheless, it should be noted that N-back had a high centrality in adolescents' graphs, and this centrality increased after 5 weeks of IC training, perhaps reflecting the increasing central role of working memory in EFs' regulation. Moreover, these results are consistent with a recent study that emphasized the increasingly critical role of Switching during the development, which would act as a mediator between IC and Updating from adolescence<sup>54</sup>. On another hand, the community analyses revealed an organization of EFs in two clusters in both children (two clusters with mixed-EF tasks) and in adolescents (one cluster with IC tasks and a second cluster composed of three tasks measuring the three different EFs). Previous SEM studies reported a differentiation of EF organization between middle childhood and adolescence<sup>15,21,24,28–31</sup>. It is important to note that the clusters obtained with community analysis are determined a posteriori (via a data-driven approach), while the factors obtained in SEM analysis are determined a priori (via a hypothesis-driven approach). Indeed, clusters derived from community analysis correspond to nodes with high mutual influence and are therefore dependent upon the data under analysis, while SEM clusters correspond to latent factors that were defined before the analysis. Hence, taken together, previous SEM studies and current NM analyses, which are based on complementary approaches, converge toward changes in EF structure from childhood, with a more general composition of EFs, to adolescence, with more specified EFs.

In addition to developmental changes, quantitative and qualitative changes in the EF structure were also found after training one EF, namely, IC. The results showed that after IC training in children, networks have increasingly stronger connections both within and between EFs and are therefore more similar to adolescents' networks than before training. On the other hand, in adolescents, changes in the EF network were subtler. More precisely, after AC training, the number of connections decreased, but some edges increased in weight, whereas after IC training, the edge weights became much more important, reflecting a more integrated network. However, these lower changes in adolescents compared to children may also be interpreted in terms of reduced training effects in adolescents. Complementary analyses using classical repeated-measures ANOVAs (see Table S1 and Fig. S1 in Supplementary Materials) indicated that adolescents did not improve their performances in the six EF tasks, while children improved their performances after IC training for Stop Signal, ANT and tendentially for TMT. The lack of progress in adolescents might reveal a ceiling effect (see Fig. S2 in Supplementary Materials). Of note, the AC and IC trainings were similar in children and adolescents, with difficulty adapted at the individual level. Importantly, except for TMT in children, classical repeated-measures ANOVAs did not detect important transfer effects, while NM could highlight changes in the organization of EFs, including both trained and nontrained tasks (e.g., Stroop and Stop Signal), thus revealing transfer effects. The community analyses also provided insights into training-related reorganizations of EF structures. In children, networks had two communities before and after the IC training and three communities after the AC training, whereas in adolescents, there were two communities before and after both types of training; these communities had only slight changes in composition, once again reflecting the reduced effects of training in adolescents compared to children. However, it can be noted that in adolescents, after IC training, one of the two communities was composed of only IC tasks and the other of attentional IC, switching and updating tasks, thus highlighting EF-specific effects.

The present study has several limitations that call for caution when interpreting the results. First, sample size is a critical issue for the reliability of statistical analysis, particularly for NM analysis<sup>56</sup>. Hence, despite the relatively large sample size used in this interventional longitudinal study in children and adolescents ( $N > 120$ ), it is important to replicate the findings with confirmatory studies conducted on larger and independent samples. Of note, the recruitment and follow-up of typically developing school-aged children and adolescents enrolled in a 5-week longitudinal study with cognitive training on a tactile tablet raised sound logistical and practical issues which has constrained the sample size. Following recent recommendations for NM analysis with small sample

size (i.e., approximately hundreds of participants), we limited the number of variables to 6<sup>57</sup> as it allowed us to recover the global structure of the network even though the full network could not be measured. This criterion also led to an imbalance of the three EFs in the creation of the networks. Indeed, IC was overrepresented (4 nodes out of 6). As this was one being trained, it seemed important to look at the impact of training on the organization of this particular EF. Because such imbalance may bias the analysis, and particularly the estimation of the partial correlations, we completed our 6-node network analysis with a balanced 3-node network analysis with networks including one measure per EF. These 3-node network further confirmed the results provided by the 6-node network analysis, namely greater connections in childhood than in adolescence and similar network changes related to training and to development. A perspective is the inclusion of latent variables in the networks<sup>58</sup>, which could allow us to observe the links, without a priori, between tasks within the same EF latent variable. Second, the behavioral changes observed from the pre- to the post-training sessions might not be attributed only to the training per se but could also reflect a 'regression to the mean' effect<sup>59</sup>. This statistical phenomenon arises when a random variable—here task scores—is extreme at baseline but closer to the mean on follow-up or vice versa and typically affects longitudinal design such as the one used in the present study. However, it is unlikely that the difference in IC efficiency change from the pre- to the post-training sessions between the IC and AC training groups only reflects such a 'regression to the mean' effect because participants were randomly assigned to the two training groups, and thus, both groups were potentially equally affected by such an effect<sup>60</sup>.

NM provides an original and relevant way to investigate the effect of cognitive training on EF organization, complementary to more classical statistical approaches, such as univariate ANOVAs. Our study combining NM and classical ANOVAs appears to be relevant to analyses of developmental and training-related cognitive changes. Recent methodological developments, such as moderated network models<sup>61</sup> or network model trees<sup>62</sup>, could be an interesting perspective to further explore factors that could influence network organization after an intervention. Because EF neural networks are known to vary with age and to correlate with EF behavioral performance<sup>34</sup>, a multimodal and multilevel approach combining network analysis at the behavioral level and the neural level (e.g., using resting-state functional magnetic resonance imaging)<sup>63</sup>, is likely an interesting direction to explore. Such an approach could provide a more complete view of EFs<sup>64</sup> and could pave the way toward an integrative approach, including behavioral, neural and genetic and environmental levels.

## Methods

**Participants.** We recruited 137 healthy participants from public schools: 77 children (33 males,  $M \pm SD = 9.86 \pm 0.55$  years, range = 9–10 years) and 60 adolescents (20 males,  $M = 16.56 \pm 0.48$  years, range = 15–17 years). All participants were right-handed as determined by the Edinburgh Handedness Inventory<sup>65</sup>, were born full-term, had normal or corrected-to-normal vision, had no history of neurological disease and had no cerebral abnormalities. Parents or legal guardians gave written informed consent for the children and the adolescents, and all children and adolescents agreed to participate. All participants were tested in accordance with the national and international norms that govern the use of human research participants. The national ethics committee (Committee for the protection of persons, CPP) approved our study in children (ID-RCB 2015-A00383-46) and in adolescents (ID-RCB 2015-A00811-48).

**Cognitive training.** In both IC and AC computerized 5-week training, the difficulty was progressively increased and adapted in real time to the learning curve of each participant to maintain his or her motivation and to prevent automaticity<sup>36,66,67</sup>. In each session, the level of difficulty was increased or decreased after each block of trials performed at a given level. All tasks were implemented on the tablet using E-prime 2.0.

The IC training included two tasks involving interference control (Color-Word Stroop task) and response inhibition (SST) because (a) IC is a multidimensional construct<sup>2</sup> and (b) transfer effects can be potentially larger when the same cognitive function is trained with different tasks<sup>66,67</sup>. In particular, each task performed by the participants during the IC training involved different types of inhibitory control processes, namely response inhibition for the Stop-Signal task and interference control for the Color-Word Stroop task. The Stop-Signal task typically requires inhibiting a motor response action after it was initiated while the Color-Word Stroop task requires inhibiting task-irrelevant information (i.e., the color denoted by the word)<sup>2</sup>.

AC training consisted of knowledge- and vocabulary-based tasks of increasing difficulty<sup>39</sup>. On each task, 4-choice trivia-like questions were presented, and participants were asked to answer by pressing on one of the four answers presented on the screen. Participants were given a maximum of 30 s to reply to each question. An online pretest performed on more than 1600 children and adolescents helped us select the questions assigned to each of the 8 levels of difficulty. Ten questions were presented at each level.

At the end of each level, based on the achieved accuracy, participants earned points that they could redeem at the end of the 25 training sessions for a small gift (books and card or board games). In all four tasks, task difficulty was increased when participants achieved 90% accuracy at a given level, decreased when participants failed to achieve 70% accuracy at a given level and remained the same when participants reached accuracy between 70 and 90% at a given level. On each task of each training session, participants started the session with the difficulty level one level below the one they achieved in the previous training session. In the two IC training tasks, the difficulty of inhibiting either the motor response initiated or the irrelevant task information was adapted after each block of training. In the Stop-Signal task, by increasing the delay between the presentation of the stimulus and the presentation of the signal to stop, the inhibition of the motor response became increasingly more difficult<sup>68</sup>. In the Color-Word Stroop task, as the delay between the presentation of the word and the coloring of the word decreased, the inhibition of the task-irrelevant information (i.e., the color denoted by the word) became increasingly more difficult<sup>69</sup>. In the AC training tasks, the answers to the questions were increasingly more difficult to determine and were adapted after each block of training. At the end of each training session, parents

were instructed to send the data file generated by E-prime 2.0, and participants were asked to complete a short autoevaluation of their motivation and engagement during the session. Levels reached at each training session are reported in Fig. S2 in the Supplementary Materials. Participants included in the analyses had to complete a minimum of 15 training sessions.

**Evaluation of EFs.** Participants performed a cognitive battery in the pre- and post-training sessions measuring different facets of EFs. Six tasks were administered to measure the three EFs: cognitive flexibility (here referred to as switching), working memory updating (here referred to as updating), and inhibitory control. The task used to identify the switching factor was the trail making test (TMT)<sup>70</sup> and for the updating factor, the N-back task<sup>71</sup> was used. Four tasks were used to identify the inhibitory control factor: the Color-Word Stroop<sup>72</sup>, the Stop-Signal task<sup>73</sup>, the Simon task<sup>74</sup> and the ANT (Attention Network Task)<sup>75</sup>; each of these tasks taps on different aspects of IC: Stroop on interference control, Stop Signal and Simon on response inhibition and ANT on attentional inhibition<sup>2,76</sup>. To limit potential differences in familiarity with the Stroop and Stop-Signal tasks used in the pre- and post-training sessions between participants of the IC and AC groups, we introduced a number of differences between these tasks and those used in the IC training sessions: (a) we used no control trials, and we did not vary the difficulty of the task in the Color-Word Stroop task; (b) the Stop-Signal delay was adapted on a trial-by-trial basis and not on a block-of-trial basis in the SST.

For each task, scores were screened and cleaned for possible aberrant values using a nonparametric approach: outliers were defined as values lower than median - 2.5 MAD or greater than median + 2.5 MAD (MAD: median absolute deviation) and considered missing values in the analyses.

**Construction and analysis of cognitive networks.** NM were completed with classical univariate statistical analyses (Analyses Of Variances, ANOVAs). Like for NM, ANOVAs were conducted separately for each of the six EF tasks for the two age groups and the two training groups. In order to assess possible group-specific effects, complementary ANOVAs were run for each task, including age group (children vs adolescents) and training group (IC vs AC) in the models.

The repeated-measures ANOVAs were estimated using mixed-effects linear models. We used the package *lme4*<sup>77</sup> with the Time (pre- or post-training) as fixed effects and intercepts for subjects as random effects. P-values were obtained by using likelihood ratio tests of the full model, including the tested effect against the model without the tested effect.

Then, separate networks, based on the correlation matrix of the EF task scores, were built for children and adolescents before training (pretest) and after training (inhibitory control training: posttest IC; active control training: posttest AC). Six networks (3 per age range) were estimated. These networks included 6 nodes corresponding to the scores of the 6 cognitive tasks, which we grouped into three EFs:

- Inhibitory control: Color-Word Stroop, Stop-Signal, Simon, and ANT scores (for Stop Signal, we calculated the SSRT as recommended<sup>78</sup>, and, for the other tasks, we calculated the difference in reaction time (RT) between incongruent and congruent trials)
- Switching: TMT flexibility score (RT difference between TMT-B and TMT-A)
- Updating: N-back score (RT difference between the 2-back and the 1-back trials).

The inclusion of trained (Stroop and Stop-Signal) and untrained (Simon and ANT) IC tasks allowed us to observe the direct effects of IC targeted training on the trained tasks but also on other IC tasks (intra-EF) and thus, to assess near transfer effects within the same EF. The inclusion of TMT and N-back allowed us to assess the effects of IC training on other EF tasks (inter-EFs) and thus to evaluate the effects of a more distant transfer while keeping the number of nodes limited to 6, as recommended for a sample size of approximately 100<sup>57</sup>.

In addition to the 6-node networks, balanced 3-node networks, with only one node per EF (Stop Signal for IC, TMT for switching and N-back for updating), were built. Such balanced networks overcome the issues for the interpretation of the 6-node network related to the partial network models that remove shared variance associated with all other EF tests in the model (i.e., the relationship between each inhibition task with switching and updating involved controlling for other tests of inhibition).

NM was used to analyze (1) the multiple relations (edges) between the different EF tasks (nodes) simultaneously and (2) how these relations change during development (children vs. adolescents) and after cognitive training (before and after training). We used the successive steps procedure proposed for network analysis in psychology<sup>79</sup>: (1) network estimation; (2) network inference (topological characterization); and (3) node community analysis. The interrelation between the different variables was modeled with a Gaussian graphical model (GGM<sup>80</sup>), a regularized partial correlation network (RPCN). The edge between two nodes/tasks corresponded to the partial correlation between the two corresponding variables, controlling for the effects of the remaining variables. We used Spearman correlations, as recommended<sup>81</sup>.

Statistical analyses were performed using R-statistical software, version 3.6.1 (R Development Core Team, 2014). The networks were constructed and visualized using the package *qgraph* version 1.6.4<sup>82</sup>. As previously recommended<sup>83</sup>, we investigated the robustness and replicability of the analyses (accuracy check) using the *bootnet* package version 1.4<sup>81</sup>. Figures of edge-weight accuracy can be found in the Supplementary Materials.

**Characterization of the networks.** The networks were characterized using both quantitative and qualitative measures. Five classical centrality measures were used to quantitatively characterize the network at node levels<sup>52</sup>: strength (the sum of the weights of the direct relations of a node to all other nodes), closeness centrality

(the inverse of the total length of all the shortest paths between the selected node and all other nodes in the network), betweenness centrality (the shortest path length connecting any two variables), expected influence (the sum of both positive and negative weights between a node and all the other nodes in the network), and degree (number of connections for each node in the network), thus defining hubs (nodes with the highest degree). The community analysis was based on the Spinglass algorithm<sup>84</sup> with standard parameters ( $\gamma = 1$ , start temperature = 1, stop temperature = 0.01, cooling factor = 0.99, spins = 25). The correlation between edge weights across networks was also estimated.

### Data availability

The corresponding author is responsible for submitting a competing interests statement on behalf of all authors of the paper. This statement must be included in the submitted article file.

Received: 30 September 2021; Accepted: 29 July 2022

Published online: 29 August 2022

### References

- Miyake, A. *et al.* The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cogn. Psychol.* **41**, 49–100 (2000).
- Diamond, A. Executive functions. *Annu. Rev. Psychol.* **64**, 135–168 (2013).
- Richland, L. E. & Burchinal, M. R. Early executive function predicts reasoning development. *Psychol. Sci.* **24**, 87–92 (2013).
- Benson, J. E., Sabbagh, M. A., Carlson, S. M. & Zelazo, P. D. Individual differences in executive functioning predict preschoolers’ improvement from theory-of-mind training. *Dev. Psychol.* **49**, 1615–1627 (2013).
- Marcovitch, S. *et al.* A longitudinal assessment of the relation between executive function and theory of mind at 3, 4, and 5 years. *Cogn. Dev.* **33**, 40–55 (2015).
- Sabbagh, M. A., Xu, F., Carlson, S. M., Moses, L. J. & Lee, K. The development of executive functioning and theory of mind. A comparison of Chinese and U.S. preschoolers. *Psychol. Sci.* **17**, 74–81 (2006).
- Cragg, L., Keeble, S., Richardson, S., Roome, H. E. & Gilmore, C. Direct and indirect influences of executive functions on mathematics achievement. *Cognition* **162**, 12–26 (2017).
- Gilmore, C. & Cragg, L. Chapter 14—the role of executive function skills in the development of children’s mathematical competencies. In *Heterogeneity of Function in Numerical Cognition* (eds Henik, A. & Fias, W.) 263–286 (Academic Press, 2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811529-9.00014-5>.
- Lee, K., Ng, S. F. & Bull, R. Learning and solving algebra word problems: The roles of relational skills, arithmetic, and executive functioning. *Dev. Psychol.* **54**, 1758–1772 (2018).
- Xu, P., Wu, D., Chen, Y., Wang, Z. & Xiao, W. The effect of response inhibition training on risky decision-making task performance. *Front. Psychol.* **11**, 1806 (2020).
- Cassotti, M., Agogué, M., Camarda, A., Houdé, O. & Borst, G. Inhibitory control as a core process of creative problem solving and idea generation from childhood to adulthood. *New Dir. Child Adolesc. Dev.* **2016**, 61–72 (2016).
- Kleibeuker, S. W., Koolschijn, P. C. M. P., Jolles, D. D., De Dreu, C. K. W. & Crone, E. A. The neural coding of creative idea generation across adolescence and early adulthood. *Front. Hum. Neurosci.* **7**, 905 (2013).
- Bjorklund, D. F. & Harnishfeger, K. K. The evolution of inhibition mechanisms and their role in human cognition and behavior. In *Interference and Inhibition in Cognition* (eds Dempster, F. N. & Brainerd, C. J.) 141–173 (Academic Press, 1995).
- Casey, B. J. *et al.* A developmental functional MRI study of prefrontal activation during performance of a go-no-go task. *J. Cogn. Neurosci.* **9**, 835–847 (1997).
- Lee, K., Bull, R. & Ho, R. M. H. Developmental changes in executive functioning. *Child Dev.* **84**, 21 (2013).
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A. & Sweeney, J. A. Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Dev.* **75**, 1357–1372 (2004).
- Paulsen, D. J., Hallquist, M. N., Geier, C. F. & Luna, B. Effects of incentives, age, and behavior on brain activation during inhibitory control: A longitudinal fMRI study. *Dev. Cogn. Neurosci.* **11**, 105–115 (2015).
- Rubia, K. *et al.* Effects of age and gender on neural networks of motor response inhibition: From adolescence to mid-adulthood. *Neuroimage* **83**, 690–703 (2013).
- Tamm, L., Menon, V. & Reiss, A. L. Maturation of brain function associated with response inhibition. *J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry* **8** (2002).
- Friedman, N. P., Miyake, A., Robinson, J. L. & Hewitt, J. K. Developmental trajectories in toddlers’ self-restraint predict individual differences in executive functions 14 years later: A behavioral genetic analysis. *Dev. Psychol.* **47**, 1410–1430 (2011).
- Friedman, N. P. *et al.* Stability and change in executive function abilities from late adolescence to early adulthood: A longitudinal twin study. *Dev. Psychol.* **52**, 326–340 (2016).
- Fujisawa, K. K., Todo, N. & Ando, J. Genetic and environmental influences on the development and stability of executive functions in children of preschool age: A longitudinal study of Japanese twins. *Infant Child Dev.* **26**, e1994 (2017).
- Pan, J., Sawyer, K., McDonough, E., Slotpole, L. & Gansler, D. Cognitive, neuroanatomical, and genetic predictors of executive function in healthy children and adolescents. *Dev. Neuropsychol.* **43**, 535–550 (2018).
- Hartung, J., Engelhardt, L. E., Thibodeaux, M. L., Harden, K. P. & Tucker-Drob, E. M. Developmental transformations in the structure of executive functions. *J. Exp. Child Psychol.* **189**, 104681 (2020).
- Shing, Y. L., Lindenberger, U., Diamond, A., Li, S.-C. & Davidson, M. C. Memory maintenance and inhibitory control differentiate from early childhood to adolescence. *Dev. Neuropsychol.* **35**, 679–697 (2010).
- Wiebe, S. A., Espy, K. A. & Charak, D. Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: I. Latent structure. *Dev. Psychol.* **44**, 575–587 (2008).
- Willoughby, M. T., Wirth, R. J., Blair, C. B., Family Life Project Investigators. Executive function in early childhood: Longitudinal measurement invariance and developmental change. *Psychol. Assess.* **24**, 418–431 (2012).
- Xu, F. *et al.* Developmental differences in the structure of executive function in middle childhood and adolescence. *PLoS ONE* **8**, e77770 (2013).
- Agostino, A., Johnson, J. & Pascual-Leone, J. Executive functions underlying multiplicative reasoning: Problem type matters. *J. Exp. Child Psychol.* **105**, 286–305 (2010).
- McAuley, T. & White, D. A. A latent variables examination of processing speed, response inhibition, and working memory during typical development. *J. Exp. Child Psychol.* **108**, 453–468 (2011).
- Wu, K. K. *et al.* Components and developmental differences of executive functioning for school-aged children. *Dev. Neuropsychol.* **36**, 319–337 (2011).
- Huizinga, M., Dolan, C. V. & van der Molen, M. W. Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia* **44**, 2017–2036 (2006).

33. Karr, J. E. *et al.* The unity and diversity of executive functions: A systematic review and re-analysis of latent variable studies. *Psychol. Bull.* **144**, 1147–1185 (2018).
34. Baum, G. L. *et al.* Modular segregation of structural brain networks supports the development of executive function in youth. *Curr. Biol.* **27**, 1561–1572.e8 (2017).
35. Best, J. R., Miller, P. H. & Naglieri, J. A. Relations between executive function and academic achievement from ages 5 to 17 in a large, representative national sample. *Learn Individ. Differ.* **21**, 327–336 (2011).
36. Klingberg, T. Training and plasticity of working memory. *Trends Cogn. Sci.* **14**, 317–324 (2010).
37. Maraver, M. J., Bajo, M. T. & Gomez-Ariza, C. J. Training on working memory and inhibitory control in young adults. *Front. Hum. Neurosci.* **10**, 588 (2016).
38. Hu, M., Wang, X., Zhang, W., Hu, X. & Chen, A. Neural interactions mediating conflict control and its training-induced plasticity. *Neuroimage* **163**, 390–397 (2017).
39. Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J. & Shah, P. Short- and long-term benefits of cognitive training. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **108**, 10081–10086 (2011).
40. Liu, Q., Zhu, X., Ziegler, A. & Shi, J. The effects of inhibitory control training for preschoolers on reasoning ability and neural activity. *Sci. Rep.* **5**, 14200 (2015).
41. Zhao, X., Chen, L., Fu, L. & Maes, J. H. R. “Wesley says”: A children’s response inhibition playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Front. Psychol.* **6**, 7 (2015).
42. Rueda, M. R., Posner, M. I. & Rothbart, M. K. The development of executive attention: Contributions to the emergence of self-regulation. *Dev. Neuropsychol.* **28**, 573–594 (2005).
43. Enge, S. *et al.* No evidence for true training and transfer effects after inhibitory control training in young healthy adults. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* **40**, 987–1001 (2014).
44. Talanow, T. & Ettinger, U. Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control training in healthy adults. *Acta Psychol.* **187**, 37–53 (2018).
45. Thorell, L. B., Lindqvist, S., BergmanNutley, S., Bohlin, G. & Klingberg, T. Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Dev. Sci.* **12**, 106–113 (2009).
46. Newman, M. *Networks* Vol. 1 (Oxford University Press, 2018).
47. Barabási, A.-L. The network takeover. *Nat. Phys.* **8**, 14–16 (2012).
48. van Bork, R. *et al.* Latent variable models and networks: Statistical equivalence and testability. *Multivar. Behav. Res.* <https://doi.org/10.1080/00273171.2019.1672515> (2019).
49. Isquith, P. K., Gioia, G. A. & Espy, K. A. Executive function in preschool children: Examination through everyday behavior. *Dev. Neuropsychol.* **26**, 403–422 (2004).
50. Roca, P., Diez, G. G., Castellanos, N. & Vazquez, C. Does mindfulness change the mind? A novel psychonecrome perspective based on Network Analysis. *PLoS ONE* **14**, e0219793 (2019).
51. Jolles, D. D. & Crone, E. A. Training the developing brain: A neurocognitive perspective. *Front. Hum. Neurosci.* **6**, 76 (2012).
52. Opsahl, T., Agneessens, F. & Skvoretz, J. Node centrality in weighted networks: Generalizing degree and shortest paths. *Soc. Netw.* **32**, 245–251 (2010).
53. Robinaugh, D. J., Millner, A. J. & McNally, R. J. Identifying highly influential nodes in the complicated grief network. *J. Abnorm. Psychol.* **125**, 747–757 (2016).
54. Karr, J. E., Rodriguez, J. E., Goh, P. K., Martel, M. M. & Rast, P. The unity and diversity of executive functions: A network approach to life span development. *Dev. Psychol.* **58**, 751–767 (2022).
55. Younger, J. *et al.* More alike than different: Novel methods for measuring and modeling executive function development. <https://www.researchsquare.com/article/rs-1032581/v1> (2021) <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1032581/v1>.
56. Epskamp, S., Borsboom, D. & Fried, E. I. Estimating psychological networks and their accuracy: A tutorial paper. *Behav. Res. Methods* **50**, 195–212 (2018).
57. Mansueto, A. C., Wiers, R., van Weert, J., Schouten, B. C. & Epskamp, S. Investigating the Feasibility of Idiographic Network Models. <https://osf.io/hgcz6> (2020) <https://doi.org/10.31234/osf.io/hgcz6>.
58. Epskamp, S., Rhemtulla, M. & Borsboom, D. Generalized network psychometrics: Combining network and latent variable models. *Psychometrika* **82**, 904–927 (2017).
59. Barnett, A. G., van der Pols, J. C. & Dobson, A. J. Regression to the mean: What it is and how to deal with it. *Int. J. Epidemiol.* **34**, 215–220 (2005).
60. Yudkin, P. L. & Stratton, I. M. How to deal with regression to the mean in intervention studies. *Lancet Lond. Engl.* **347**, 241–243 (1996).
61. Haslbeck, J., Borsboom, D. & Waldorp, L. Moderated Network Models. *ArXiv arXiv:1807.02877 Stat* (2020).
62. Jones, P. J., Mair, P., Simon, T. & Zeileis, A. Network trees: A method for recursively partitioning covariance structures. *Psychometrika* <https://doi.org/10.1007/s11336-020-09731-4> (2020).
63. Zink, N., Markett, S. & Lenartowicz, A. A new era for executive function research: On the transition from centralized to distributed executive functioning. <https://osf.io/be7nm> (2020) <https://doi.org/10.31234/osf.io/be7nm>.
64. Lydon-Staley, D. M., Cornblath, E. J., Blevins, A. S. & Bassett, D. S. Modeling brain, symptom, and behavior in the winds of change. *Neuropsychopharmacology* <https://doi.org/10.1038/s41386-020-00805-6> (2020).
65. Oldfield, R. C. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* **9**, 97–113 (1971).
66. Buschkuhl, M., Jaeggi, S. M. & Jonides, J. Neuronal effects following working memory training. *Dev. Cogn. Neurosci.* **2**, S167–S179 (2012).
67. Green, C. S. & Bavelier, D. Exercising your brain: A review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychol. Aging* **23**, 692–701 (2008).
68. Aron, A. R., Robbins, T. W. & Poldrack, R. A. Inhibition and the right inferior frontal cortex: One decade on. *Trends Cogn. Sci.* **18**, 177–185 (2014).
69. Appelbaum, L. G., Boehler, C. N., Davis, L. A., Won, R. J. & Woldorff, M. G. The dynamics of proactive and reactive cognitive control processes in the human brain. *J. Cogn. Neurosci.* **26**, 1021–1038 (2014).
70. Reitan, R. M. & Wolfson, D. *Neuropsychological Evaluation of Older Children* (Neuropsychology Press, 1992).
71. Kirchner, W. Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *J. Exp. Psychol.* **55**, 352–358 (1958).
72. Stroop, J. R. Studies of interference in serial verbal reactions. *J. Exp. Psychol.* **18**, 643–662 (1935).
73. Logan, G. D. On the ability to inhibit thought and action: A users’ guide to the stop signal paradigm. In *Inhibitory Processes in Attention, Memory, and Language* 189–239 (Academic Press, 1994).
74. Simon, J. R. & Wolf, J. D. Choice reaction time as a function of angular stimulus-response correspondence and age. *Ergonomics* **6**, 99–105 (1963).
75. Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A. & Posner, M. I. Testing the efficiency and independence of attentional networks. *J. Cogn. Neurosci.* **14**, 340–347 (2002).
76. Tiego, J., Testa, R., Bellgrove, M. A., Pantelis, C. & Whittle, S. A hierarchical model of inhibitory control. *Front. Psychol.* **9**, 1339 (2018).
77. Bates, D., Maechler, M. & Bolker, B. lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and Eigen. R package version 0.999999-0. URL <http://CRAN.R-Project.org/package=lme4> (2012).



78. Verbruggen, F. *et al.* A consensus guide to capturing the ability to inhibit actions and impulsive behaviors in the stop-signal task. *Elife* **8**, e46323 (2019).
79. Fried, E. I. *et al.* Replicability and generalizability of posttraumatic stress disorder (PTSD) networks: A cross-cultural multisite study of PTSD symptoms in four trauma patient samples. *Clin. Psychol. Sci.* **6**, 335–351 (2018).
80. Lauritzen, S. L. & Wermuth, N. Graphical models for associations between variables, some of which are qualitative and some quantitative. *Ann. Stat.* **17**, 31–57 (1989).
81. Epskamp, S. & Fried, E. I. A tutorial on regularized partial correlation networks. *Psychol. Methods* **23**, 617–634 (2018).
82. Epskamp, S., Cramer, A. O. J., Waldorp, L. J., Schmittmann, V. D. & Borsboom, D. qgraph: Network visualizations of relationships in psychometric data. *J. Stat. Softw.* **48**, 1–18 (2012).
83. Borsboom, D., Robinaugh, D. J., ThePsychoSystems Group, Rhemtulla, M. & Cramer, A. O. J. Robustness and replicability of psychopathology networks. *World Psychiatry* **17**, 143–144 (2018).
84. Reichardt, J. & Bornholdt, S. Statistical mechanics of community detection. *Phys. Rev. E* **74**, 016110 (2006).

## Acknowledgements

The study was supported by a grant from the French National Research Agency (ANR-14-CE30-0014-01 APEX).

## Author contributions

G.B. and A.C. designed the project. G.R., I.M. and A.C. conducted the experiments. L.L.-S., I.M. and A.C. contributed to data preparation. I.M. and A.C. analysed the results. I.M. wrote the first draft of the manuscript. All authors critically reviewed the paper and contributed to its writing and revision.

## Competing interests

The authors declare no competing interests.

## Additional information

**Supplementary Information** The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17695-x>.

**Correspondence** and requests for materials should be addressed to A.C.

**Reprints and permissions information** is available at [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints).

**Publisher's note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2022

## Résumé français

Le cerveau humain possède la capacité d'apprendre et de s'adapter aux exigences de son milieu. Dans ce contexte, de nombreuses recherches se portent actuellement sur le développement et l'apprentissage des compétences exécutives, dont le contrôle inhibiteur (CI) qui joue un rôle clef dans la réussite académique, le succès professionnel et la santé mentale. Il existe actuellement des interventions à même de stimuler le CI, notamment durant l'enfance et l'adolescence lorsque la plasticité du cerveau est importante. Cela est le cas de la méditation de pleine conscience, une pratique qui sollicite en particulier l'inhibition afin de garder une attention sans jugement aux expériences du moment présent, favorisant ainsi l'autorégulation et la gestion émotionnelle. Dans ce contexte, cette thèse a eu pour but d'étudier l'entraînement du CI via la méditation de pleine conscience avec une approche multimodale et développementale. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet APrentissages EXécutifs (APEX), qui vise à évaluer chez les enfants et les adolescents les effets d'un entraînement cognitif de cinq semaines sur tablette tactile, soit en ciblant directement le CI (EC), soit via la méditation de pleine conscience (PC), par rapport à un groupe de contrôle actif (CA). Nous avons ainsi exploré les aspects cognitifs (Etude 1), physiologiques (Etude 2) et neuroanatomiques (Etude 3) influençant les performances de CI avant et après les interventions. Au niveau cognitif, nous avons évalué l'effet des interventions EC et PC sur les habiletés dites chaudes et froides du CI, i.e. impliquant ou non des composantes socioaffectives, respectivement. Au niveau physiologique, nous avons exploré chez les adolescents l'influence du taux de glucose sanguin et de l'indice de masse corporelle (IMC) sur les compétences de CI, avant et après les trois interventions. Au niveau cérébral, enfin, nous avons étudié la relation entre les performances de CI avant et après ces interventions et les motifs des sillons du cortex cingulaire antérieur (CCA), une région clef du réseau neural de l'inhibition. Dans ce contexte, nous avons pu montrer que (1) l'entraînement ciblant le CI a globalement amélioré le CI froid mais pas le CI chaud, tandis que la pratique de la PC a amélioré le CI chaud mais pas le CI froid. Seuls les enfants ont bénéficié significativement de ces interventions. Nous avons également démontré que (2) la glycémie élevée était associée à une faible performance d'inhibition de l'interférence (Stroop) et une efficacité accrue sur l'inhibition des réponses (tâche de stop signal) chez les adolescents avec un IMC faible. Cela peut refléter la dynamique complexe entre la glycémie, l'IMC et le type de CI requis. En outre (3), nous avons répliqué l'association entre l'asymétrie du CCA et une efficacité de CI accrue en comparaison aux motifs symétriques. De plus, nous avons mis en évidence que le gain de performance entre le pré et le posttest du groupe d'EC concerne uniquement les enfants présentant des motifs symétriques du CCA. Cela plaide en faveur d'une hypothèse de compensation et d'une spécificité de l'entraînement ciblant directement le CI. Nous pouvons ainsi conclure que les performances de CI sont influencées à différents niveaux, notamment par des facteurs cognitifs (e.g. le type de CI et le niveau de base), physiologiques (le niveau de glucose et l'IMC) et cérébraux (la morphologie sulcale du CCA). Dans une perspective translationnelle, ces résultats soutiennent que la mise en œuvre d'un entraînement au CI via la méditation de pleine conscience pourrait étayer une régulation socioémotionnelle plus efficace, particulièrement dès l'enfance.

## Résumé anglais

The human brain has the capacity to learn and adapt to the demands of its environment. Much research currently focus on the development and learning of executive skills, including inhibitory control (IC), which plays a key role in academic success, professional success and mental health. Some interventions can stimulate the IC, especially during childhood and adolescence when brain plasticity attains high levels. This is the case of mindfulness meditation, which particularly involves IC in order to maintain non-judgmental attention to present moment experiences, thus promoting self-regulation and emotional regulation. In this context, our aim was to study the training of IC via mindfulness meditation using a multimodal and developmental approach. This PhD thesis is part of the APrentissages EXécutifs (Executive Training, APEX) project. It aims at evaluating in children and adolescents the effects of a five-week cognitive training on a tactile tablet, either directly targeting IC (CT) or via mindfulness meditation (MM), compared to an active control group (AC). We investigated cognitive (Study 1), physiological (Study 2), and neuroanatomical (Study 3) aspects influencing CI performance before and after the interventions. At the cognitive level, we evaluated the effect of CT and MM interventions on hot and cool IC skills, i.e. in situations with and without emotional charge respectively. At the physiological level, we investigated in adolescents the influence of blood glucose level and body mass index (BMI) on IC skills, before and after the three interventions. Finally, at the brain level, we investigated the relationship between IC performance before and after these interventions according to the sulcal patterns of the anterior cingulate cortex (ACC), a key region of the IC network. We were able to show that (1) the IC training overall improved cool IC but not hot IC, whereas MM practice improved hot IC but not cool IC. Furthermore, only children benefited significantly from the interventions. We also showed that (2) high blood glucose level was associated with poor interference inhibition performance (Stroop) and increased efficacy on response inhibition (Stop Signal task) in low BMI adolescents on pretest. This may reflect the complex dynamics between blood glucose, BMI, and the type of CI required. In addition (3), we replicated the association between ACC asymmetry and increased IC efficacy compared with symmetric patterns. Moreover, we revealed that the performance gain between the pre- and posttest of the CT group concerns only children with symmetric ACC patterns. This supports the compensation hypothesis and the specificity of training directly targeting the IC. We can thus conclude that IC performance is influenced at different levels, including cognitive (e.g., IC type and baseline level), physiological (glucose level and BMI), and brain (ACC sulcal pattern) factors. From a translational perspective, these results suggest that implementing IC training via mindfulness meditation could support a more effective social-emotional management, particularly in childhood.