



**HAL**  
open science

# Des marqueurs comportementaux et cérébraux de la distractibilité au cours du développement typique à la validation d'un nouvel outil diagnostique des déficits attentionnels

Roxane Hoyer

## ► To cite this version:

Roxane Hoyer. Des marqueurs comportementaux et cérébraux de la distractibilité au cours du développement typique à la validation d'un nouvel outil diagnostique des déficits attentionnels. Neurosciences. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSE1247 . tel-03612549

**HAL Id: tel-03612549**

**<https://theses.hal.science/tel-03612549>**

Submitted on 17 Mar 2022

**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.



N°d'ordre NNT : 2020LYSE1247

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**l'Université Claude Bernard Lyon 1**

**Ecole Doctorale N° 476**  
**Neurosciences et Cognition**

**Spécialité de doctorat** : Neurosciences Cognitives

Soutenue publiquement le 27/11/2020, par :  
**Roxane S. HOYER**

---

**Des marqueurs comportementaux et  
cérébraux de la distractibilité au cours  
du développement typique à la  
validation d'un nouvel outil  
diagnostique des déficits attentionnels**

---

Devant le jury composé de :

|                          |                         |                     |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| Dr. Pascal BARONE        | CNRS Toulouse           | Examineur           |
| Dr. Magali BATTY         | Université Toulouse 2   | Rapporteure         |
| Dr. Aurélie BIDEY-CAULET | INSERM Lyon             | Directrice de thèse |
| Pr. Pierre FOURNERET     | Hospices Civils de Lyon | Examineur           |
| Dr. Marianne LATINUS     | INSERM Tours            | Rapporteure         |
| Dr. Fabien PERRIN        | Université Lyon 1       | Examineur           |

*A Marcel et Jacqueline.*

## **Remerciements**

Je souhaite bien amicalement remercier ma directrice de thèse, Aurélie Bidet-Caulet, pour toutes ces années de supervision : lorsque je t'ai contacté pour un stage lors j'étais bien loin de me douter que nous continuerions à travailler ensemble pendant les six années suivantes. Durant cette période et en toutes circonstances, tu t'es toujours montrée disponible et fiable. Merci de m'avoir épaulée durant ces années parfois difficiles et de t'être montrée à l'écoute. Grâce à ton ouverture d'esprit, nous avons toujours pu discuter de nos divergences d'opinions, qu'elles soient pratiques ou théoriques ; il me semble que cela nous a permis de trouver une bonne synergie professionnelle. Merci de t'être investie pour que je puisse réaliser cette thèse dans les meilleures conditions possibles et pour m'avoir si bien formée. J'espère que notre collaboration scientifique pourra perdurer.

J'aimerais remercier les membres du jury du comité de thèse pour le temps qu'ils ont accepté de prendre pour évaluer le travail présenté dans ce manuscrit.

Je voudrais également remercier Anne Caclin, Perrine Ruby et Annie Moulin pour leur aide et leur soutien durant toutes ces années. Merci à Martine, la meilleure secrétaire que j'ai rencontré : sans toi je me serais probablement noyée dans un océan de papiers administratifs. Un grand merci à Lesly Fornoni pour m'avoir permis de comprendre l'incompréhensible mécanique administrative liée aux aspects éthiques de la recherche. Enfin, merci à Patrick Bouchet, Claude Delpuech et Sébastien Daligault qui m'ont toujours ingénieusement aidé lorsque je rencontrais des problèmes techniques lors des manips.

Un grand merci, bien sûr, à tous mes collègues du laboratoire. Merci aux anciens du labo avec qui j'ai passé de très bonnes premières années à DYCOG : Raphaël, Mathilde et bien sûr Hesham. Merci à Benjamin, Adrien et Benoit pour toutes ces bons moments partagés lors des pauses de midi. Un merci particulier à Judith, Anne K. et Prisca, ces femmes qui m'inspirent tant de par leur talent que de par leur personnalité. Je souhaite aussi remercier Oussama et Romain qui m'ont tant appris en statistiques et qui se sont toujours montrés disponibles pour m'aider lorsque j'apprenais à coder sous R. Puis quelques remerciements particuliers pour mes collègues de bureau : merci Salomé pour ta bonne humeur et ton enthousiasme, cette attitude positive m'a remonté le moral plus d'une fois ; merci à Agathe pour ta gentillesse, ta patience et ton écoute attentive mais aussi pour ces bons moments que nous avons pu partager. Merci à Lou pour avoir donné une petite touche blingbling à notre bureau et pour avoir su utiliser la trottinette à bon escient pour que nous n'ayons jamais soif. Jérémie, je ne te dis pas merci car ce serait conditionner ton besoin d'attention, mais sache que je suis ravie de me dire que je vais

pouvoir travailler en ta compagnie encore un moment. Enfin merci à Rémy, pour toutes ces petites loutres, mais surtout pour les discussions personnelles et scientifiques si intéressantes que nous avons pu avoir ; j'espère que nous pourrons travailler ensemble dans le futur. Enfin, un grand merci à Mélodie, Nicole, Florian pour m'avoir écoutée et encouragée toutes ces années et pour m'avoir redonnée le sourire quand ça n'allait plus.

Merci beaucoup à Christina Karns et Eric Pakulak. Je suis ravie que notre collaboration ait été fructueuse et j'espère que nous pourrons continuer à travailler ensemble lors de futurs projets.

Je remercie chaleureusement Vania Herbillon pour sa gentillesse, sa bonne humeur mais également son aide et sa motivation pour mettre en place les études cliniques qui seront détaillées dans ce manuscrit. Merci également à Julitta de Bellecisz et Pascale Keo Kosal avec qui j'ai pu passer de très bon moment lors de mes visites à l'hôpital.

J'aimerai aussi remercier Fabien Perrin et Marie Avillac pour m'avoir si bien conseillée lorsque j'ai commencé à enseigner.

Je voudrai particulièrement remercier Marion Navarro, Julie Hemmerlin et Mégane Riedinger qui m'ont aidée à réaliser les sessions expérimentales lors des études présentées dans ce manuscrit.

Merci également à Alexandra Serre et Camille Fakche.

Merci à tous les participants des études décrites dans cette thèse, ainsi qu'au personnel des écoles, collèges et lycées de m'avoir aidée à organiser les passations comportementales au sein de leurs établissements. Plus particulièrement, merci à Emilie Subra pour son investissement et son aide lors de ce projet.

Enfin, je souhaite remercier ma famille. Merci à Maëlle et Yann pour m'avoir soutenue. Merci à Avel pour m'avoir toujours permise de m'aérer l'esprit. Merci à Félix pour m'avoir encouragée durant toutes ces années.

## **Résumé**

Il est communément admis que les enfants se laissent plus facilement distraire que les adultes. La distractibilité naturellement exacerbée chez l'enfant peut découler (i) d'une difficulté à porter volontairement l'attention sur la tâche en cours, (ii) d'une réaction attentionnelle involontaire trop importante aux stimuli distracteurs survenant alentour, ou (iii) de ces deux phénomènes à la fois. S'il est bien connu, à ce jour, que l'enfant présente bien des difficultés d'attention volontaire, l'effet des stimuli distracteurs sur le comportement et le fonctionnement cérébral de l'enfant a été peu étudié. Dans un cadre clinique, la caractérisation imprécise de la distractibilité au cours du développement typique impacte le diagnostic des déficits attentionnels : comment objectiver la présence d'un trouble pathologique de la distractibilité si la norme elle-même est mal définie ?

Dans l'objectif de pallier ce manque de connaissances, nous avons utilisé un nouveau paradigme, le Competitive Attention Test (CAT), pour caractériser le développement typique de la distractibilité auditive de l'enfance à l'âge adulte (4 à 25 ans ; N=423). Pris dans leur ensemble, les résultats que nous avons obtenus indiquent que plusieurs composantes attentionnelles (e.g., attention volontaire, involontaire, alerte phasique) conditionnent l'émergence de la distractibilité accrue chez l'enfant ; ces composantes présentent des trajectoires développementales dissociées. Dans une approche électrophysiologique, nous avons ensuite enregistré l'activité cérébrale d'enfants et d'adultes (6, 11-13 et 18-25 ans) réalisant le CAT : l'analyse préliminaire des potentiels évoqués suggère une immaturité des mécanismes cérébraux volontaires d'anticipation et de réorientation vers la tâche en cours chez les enfants et les adolescents. Enfin, dans le but de permettre l'utilisation clinique du CAT, nous avons mis en place une approche méthodologique visant à établir sa validité de contenu, de critère et de construit. Cette procédure de validation permettra notamment de déterminer si le CAT est un outil pertinent pour l'aide au diagnostic du trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité.

*Mots clefs* : développement cérébral chez l'enfant, attention, distractibilité auditive, validation psychométrique.

## ***English summary***

It is common knowledge that children are more prone to distractions than adults. Increased distractibility in typically developing children can either result from (i) a difficulty to focus voluntarily attention on target/relevant activities, (ii) an increased involuntary attention to irrelevant distractors occurring in the surroundings, or (iii) both these phenomena. Previous studies investigating attentional development through childhood have reported reduced voluntary attention abilities in children; however, the specific behavioral and brain impact of irrelevant distractors which involuntarily capture attention, remains to be identified. This lack of knowledge leads to difficulties in assessing distractibility in a clinical point of view: how could one diagnose pathological distractibility if the norm is still undefined?

To fill the aforementioned gap, we used a recently developed paradigm, the Competitive Attention Test (CAT), to characterize the development of auditory distractibility from childhood to adulthood (4 to 25 years old; N=423). Altogether, findings from this research work establish that several attentional components contribute to distractibility (e.g., voluntary and involuntary attention, phasic arousal); these components follow different developmental trajectories through childhood. In an electrophysiological approach, we recorded the brain activity of children and adults (6, 11-13 and 18-25 years old) while performing the CAT: preliminary analysis of evoked potentials suggests immature brain mechanisms of voluntary anticipation and reorientation towards the ongoing task in children and teenagers. Finally, in order to make the CAT usable in clinical settings, we implemented a methodological approach to prove its content, criterion and construct validity. This validation procedure will enable to determine if (i) the CAT can be a relevant tool to assess attention deficits, in particular as part of the clinical diagnosis of attention deficit disorder with or without hyperactivity.

*Keywords:* brain development in children, attention, auditory distractibility, psychometric validation.

## ***Résumé substantiel***

L'attention est actuellement conceptualisée comme une fonction cérébrale qui, volontairement ou non, facilite le traitement de certaines informations tout en ignorant les autres. L'attention peut être volontairement orientée vers les informations les plus pertinentes pour réaliser une tâche en cours ; elle peut aussi être capturée involontairement par un stimulus saillant, inattendu, et être détournée de la tâche en cours. Cette forme involontaire de l'attention permet de réagir à un événement important mais non pertinent pour la tâche réalisée (e.g. une alarme au feu). Un bon équilibre entre l'attention volontaire et involontaire est crucial pour réaliser efficacement une tâche en restant réactif à l'environnement, sans être distrait en permanence. Cet équilibre est à l'origine de la distractibilité. Par conséquent, la mesure dissociée de l'effet comportemental et cérébral de l'attention volontaire et involontaire implique nécessairement la mise en place d'un design expérimental visant à induire à la fois l'orientation attentionnelle volontaire vers une cible pertinente, et une capture attentionnelle par des stimuli distracteurs non pertinents.

S'il est communément admis que les enfants sont plus facilement distraits que les adultes, l'origine cérébrale et comportementale de la distractibilité durant l'enfance reste à ce jour mal définie dans le domaine des neurosciences cognitives. Pour cause, les tests neuropsychologiques existant ne permettent pas les mesures simultanées et dissociées de l'attention volontaire et involontaire. Cette difficulté à solliciter et mesurer, lors d'une même tâche, les différentes composantes attentionnelles de la distractibilité empêche la caractérisation précise de son développement. Les études réalisées par le passé indiquent que la distractibilité accrue chez l'enfant résulterait de capacités attentionnelles volontaires plus faibles que chez l'adulte, tandis que les résultats concernant l'attention involontaire sont moins robustes et ne permettent pas de précisément identifier l'impact que peut avoir la survenue d'un distracteur sur le fonctionnement comportemental et cérébral de l'enfant. Le manque de standards concernant l'efficacité des composantes attentionnelles de la distractibilité chez l'enfant neuro-typique impacte par ailleurs la pratique clinique lorsqu'il s'agit de diagnostiquer la présence un déficit attentionnel : comment détecter le pathologique quand la norme est elle-même mal définie ?

Pour mieux comprendre comment se développent les corrélats comportementaux et cérébraux de la distractibilité de l'enfance à l'âge adulte, nous avons réalisé plusieurs études basées sur l'utilisation d'un nouveau paradigme, le Competitive Attention Test (CAT), mesurant simultanément les composantes attentionnelles volontaire et involontaire



dans la modalité auditive. Les premières études (Etude 1 et Etude 2) réalisées lors de ce travail de thèse avaient pour but de combler le manque de connaissances fondamentales concernant la distractibilité chez l'enfant au développement typique, ce en étudiant les variations de différents marqueurs comportementaux de l'attention en fonction de l'âge (4 à 25 ans ; N≈450). Pris dans leur ensemble, les résultats de ces études indiquent que la distractibilité accrue avant 8 ans s'explique principalement par une difficulté à volontairement maintenir l'attention sur une tâche, ainsi qu'à un effet d'alerte phasique et de distraction trop important. Entre 9 et 12 ans, l'attention soutenue s'améliore mais reste immature, l'effet de l'alerte phasique diminue mais, à cet âge, les enfants présentent de nombreux comportements impulsifs en réponse aux distracteurs. Enfin, plus tard dans l'adolescence, la distractibilité se manifeste majoritairement par des réponses impulsives lors de l'anticipation de stimuli cibles. Par ailleurs, certains résultats indiquent également que le statut socio-économique de la famille de l'enfant peut influencer le développement de la distractibilité durant la petite enfance (Etude 2). Pour mieux comprendre comment le développement fonctionnel du cerveau peut sous-tendre le développement comportemental de la distractibilité, nous avons également réalisé une étude visant à identifier ses corrélats électrophysiologiques chez l'enfant et l'adulte (Etude 3 ; 6, 11-13 et 18-25 ans ; N≈44). L'analyse préliminaire des potentiels évoqués suggère une immaturité des mécanismes cérébraux volontaires d'anticipation et de réorientation vers la tâche en cours chez les enfants et les adolescents. L'analyse complète de réponses cérébrales pendant la réalisation du CAT permettra prochainement de caractériser l'origine cérébrale de la distractibilité durant l'enfance.

Enfin, dans le but de permettre l'utilisation clinique du CAT, nous avons mis en place une procédure de validation visant à établir sa validité de contenu, de critère et de construit. La méthodologie de cette procédure de validation est détaillée dans ce manuscrit. Cette procédure permettra de déterminer si le CAT peut être un outil pertinent pour l'aide au diagnostic du trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité chez l'enfant.

## **Table des matières**

|  |     |
|--|-----|
| Section I : Introduction.....  | 1   |
| Préambule .....  | 2   |
| Chapitre 1. Conceptualiser l'attention .....   | 4   |
| 1.1. L'attention : modèles pionniers d'une fonction cognitive protéiforme .....  | 4   |
| 1.2. Le contrôle volontaire de l'attention .....   | 11  |
| 1.3. Capture involontaire de l'attention .....   | 19  |
| 1.4. L'état d'alerte.....  | 25  |
| 1.5. La distractibilité.....   | 28  |
| 1.6. Conclusion du chapitre .....  | 33  |
| Chapitre 2. Développement de la distractibilité .....  | 35  |
| 2.1. Approche neurocognitive du développement de l'enfant.....   | 35  |
| 2.2. Développement des manifestations comportementales de la distractibilité de l'âge<br>préscolaire à l'âge adulte..... | 39  |
| 2.3. Développement des corrélats cérébraux de la distractibilité .....   | 47  |
| 2.4. Conclusion du chapitre .....  | 76  |
| Chapitre 3. Vers une mesure standardisée de la distractibilité .....   | 77  |
| 3.1. La distractibilité : du normal au pathologique .....  | 77  |
| 3.2. Quelles mesures disponibles ? .....   | 83  |
| 3.3. Précis de méthodologie pour la validation d'un nouvel outil clinique .....  | 88  |
| 3.4. Conclusion du chapitre .....  | 93  |
| Problématique.....   | 94  |
| <br>   |     |
| Section II : Méthode .....   | 96  |
| 1. Protocole expérimental : le Competitive Attention Test (CAT) .....  | 97  |
| 2. Procédure expérimentale .....   | 101 |
| 3. Marqueurs comportementaux utilisés pour les analyses statistiques.....  | 102 |
| 3.1. Temps de réaction.....  | 102 |
| 3.2. Types de réponse.....   | 103 |
| 3.3. Marqueurs comportementaux fournis par le CAT et aspects cognitifs évalués :<br>synthèse.....                        | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| Section III : Travaux expérimentaux .....   | 107 |
| ETUDE 1 .....   | 108 |
| 1. Title and abstract .....   | 108 |
| 2. Introduction .....   | 109 |
| 3. Methods.....   | 113 |
| 3.1. Participants.....  | 113 |
| 3.2. Stimuli and Task.....  | 114 |
| 3.3. Procedure.....   | 116 |
| 3.4. Measurement parameters.....  | 117 |
| 3.5. Statistical analyses .....   | 118 |
| 4. Results.....   | 123 |
| 4.1. Population characteristics.....  | 123 |
| 4.2. Behavioral Data .....  | 123 |
| 4.3. Response types.....  | 126 |
| 5. Discussion .....   | 131 |
| 6. Supplementary information .....  | 138 |
| 6.1. Supplementary figures.....   | 138 |
| 6.2. Supplementary Information S1. Instructions .....                               | 143 |
| 6.3. Supplementary Information S2. RT lower limit calculation .....                 | 144 |
| 6.4. Supplementary Information S3. Statistical analysis of auditory thresholds..... | 145 |
| 6.5. Supplementary Information S4. Statistical analysis of attention scores.....    | 145 |
| ETUDE 2 .....   | 146 |
| 1. Title and abstract .....   | 146 |
| 2. Introduction .....   | 148 |
| 3. Methods.....   | 158 |
| 3.1. Participants.....  | 158 |
| 3.2. Stimuli and task .....   | 159 |
| 3.3. Procedure.....   | 160 |
| 3.4. Measurement parameters.....  | 161 |
| 3.5. Statistical analysis .....   | 162 |
| 4. Results.....   | 166 |
| 4.1. Sample characteristics .....   | 166 |
| 4.2. Behavioral Data.....   | 166 |
| 5. Discussion .....   | 171 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.1. General development of attention with age.....                                | 171 |
| 5.2. Development of distractibility as a function of SES .....                     | 175 |
| 5.3. Conclusion .....  | 178 |
| 5.4. Limitations and future directions .....                                       | 179 |
| 6. Appendix.....   | 180 |
| A. Behavioral arousal and distraction effect in the CAT paradigm .....             | 180 |
| B. Instructions and illustrations.....   | 180 |
| C. RT lower limit.....   | 183 |
| D. Response type categorization .....  | 184 |
| E. Details for statistical analyses of RT variability and erroneous responses..... | 185 |
| F. Distribution of behavioral responses made after the target occurrence .....     | 186 |
| G. Distribution of behavioral responses made before the target.....                | 187 |
| ETUDE 3 .....  | 188 |
| 1. Title.....  | 188 |
| 2. Introduction .....  | 188 |
| 3. Methods.....  | 192 |
| 3.1. Participants.....   | 192 |
| 3.2. Stimuli and task .....  | 192 |
| 3.3. Procedure.....  | 194 |
| 3.4. Behavioral data analysis.....   | 195 |
| 3.5. EEG data.....   | 197 |
| 3.6. Statistical analyses. ....  | 198 |
| 4. Results.....  | 203 |
| 4.1. Sample characteristics .....  | 203 |
| 4.2. Behavioral data .....   | 203 |
| 4.3. EEG data.....   | 211 |
| 5. Discussion .....  | 217 |
| 5.1. Top-down orienting and anticipation effects.....                              | 217 |
| 5.2. Sustained attention.....  | 219 |
| 5.3. Facilitation and distraction effect due to distractor occurrence.....         | 219 |
| 5.4. Impulsivity and motor control .....   | 220 |
| 5.5. Conclusion .....  | 221 |
| 6. Supplementary information .....   | 222 |
| A. Detailed measurements parameters .....  | 222 |
| B. Auditory threshold analysis .....   | 223 |

|   |     |
|---|-----|
| C. Detailed parameter for statistical analysis of RT SD and erroneous responses .....     | 224 |
| D. Distributions of reaction times.....   | 225 |
| E. Distribution of responses after target .....   | 226 |
| <br>  |     |
| Section IV : Approche méthodologique pour la validation du Competitive Attention Test.... | 227 |
| 1. Foreword .....   | 228 |
| 2. Content validity .....   | 229 |
| 2.1. Procedure.....   | 229 |
| 2.2. Planned analysis .....   | 233 |
| 3. Criterion validity .....   | 235 |
| 3.1. Procedure.....   | 235 |
| 3.2. Planned analysis .....   | 237 |
| 4. Construct validity.....  | 242 |
| 5. The CAT application .....  | 243 |
| 6. Summary .....  | 245 |
| <br>  |     |
| Section V : Discussion.....   | 246 |
| Le développement de la distractibilité de l'enfance à l'âge adulte .....                  | 247 |
| Influence de l'environnement socio-économique sur le développement de l'attention .....   | 257 |
| Vers une meilleure détection des dysfonctionnements de la distractibilité.....            | 259 |
| Conclusions et perspectives .....   | 262 |
| <br>  |     |
| Section VI : Références.....  | 263 |

## Liste des figures

### Section I : Introduction

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1</b> : Modèle de l'attention de Broadbent.....   | 5  |
| <b>Figure 2</b> : Modèle de l'attention de Treishman.....   | 7  |
| <b>Figure 3</b> : Comparaison simplifiée des modèles pionniers de la sélection attentionnelle.  | 8  |
| <b>Figure 4</b> : Les systèmes attentionnels selon Posner .....   | 12 |
| <b>Figure 5</b> : Illustration du déroulement des essais dans une tâche de type Posner .....  | 13 |
| <b>Figure 6</b> : Temps de réaction en fonction de l'intervalle entre l'indice et la cible dans une tâche de Posner.....                          | 14 |
| <b>Figure 7</b> : Temps de réaction en fonction de l'intervalle entre l'indice et la cible dans une tâche de Posner avec cible périphérique. .... | 15 |
| <b>Figure 8</b> : Illustration du déroulement des essais dans des paradigmes Oddball actifs.  | 22 |
| <b>Figure 9</b> : Modèle de la distractibilité selon Wetzel & Schröger .....  | 23 |
| <b>Figure 10</b> : Projections du Locus Coeruleus.....  | 26 |
| <b>Figure 11</b> : Illustration du déroulement des essais du CAT. ....  | 30 |
| <b>Figure 12</b> : Représentation schématique de la dynamique des effets des sons<br>distracteurs dans le paradigme CAT .....                     | 31 |
| <b>Figure 13</b> : Augmentation du volume de matière grise dans le cerveau de 5 à 20 ans..  | 37 |
| <b>Figure 14</b> : Anatomie de l'oreille .....  | 48 |
| <b>Figure 15</b> : Représentation schématique du circuit de l'information au sein des voies<br>auditives primaires .....                          | 50 |
| <b>Figure 16</b> : Représentation schématique du principe de l'électroencéphalographie .....  | 51 |
| <b>Figure 17</b> : Modulation des réponses auditives évoquées par l'attention.....  | 52 |
| <b>Figure 18</b> : Effet de suppression de la P50.....  | 53 |
| <b>Figure 19</b> : Composantes de la réponse N1 auditive chez l'adulte .....  | 54 |
| <b>Figure 20</b> : Réponse cérébrale N1 et attention.....   | 55 |
| <b>Figure 21</b> : Topographie de la P2 en réponse lors de la perception d'un son .....   | 56 |
| <b>Figure 22</b> : Topographie de la N2 en réponse à un son .....   | 57 |
| <b>Figure 23</b> : Phénomène de suppression de la réponse P50 chez l'enfant et l'adulte .....   | 58 |
| <b>Figure 24</b> : Modulation du complexe P1-N1 en réponse à un son chez l'enfant .....   | 59 |
| <b>Figure 25</b> : Changement de d'amplitude et de latence de la N1, P1, N2 et P2 en réponse<br>à un son de l'enfance à l'âge adulte. ....        | 61 |
| <b>Figure 26</b> : Modulation de la CNV par l'attention lors d'une tâche de type Posner .....   | 63 |
| <b>Figure 27</b> : Dissociation des réponses P3a et P3b en réponse à un son distracteur .....   | 64 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 28</b> : Générateurs de la P3b en réponse à un son cible.....  | 64 |
| <b>Figure 29</b> : Topographie de la réponse P3b en réponse à un son attendu .....   | 65 |
| <b>Figure 30</b> : Topographie des réponses N1, P2, P3a-p (early P3) et P3b (late P3) en réponse à son distracteur.....  | 66 |
| <b>Figure 31</b> : Générateurs du complexe P3a en réponse à un son distracteur.....  | 66 |
| <b>Figure 32</b> : Topographie de la RON suite à l'apparition d'un son distracteur .....   | 67 |
| <b>Figure 33</b> : Modulations de la N1, P2, complexe P3 à un son distracteur par l'attention volontaire dans le paradigme CAT .....                                 | 68 |
| <b>Figure 34</b> : Réponse N1 aux cibles précédées par des distracteurs dans le paradigme CAT.....   | 69 |
| <b>Figure 35</b> : Topographie de la CNV en fonction de l'âge. ....  | 71 |
| <b>Figure 36</b> : Trajectoires développementales, de l'enfance à l'âge adulte, de la latence et de l'amplitude de la P3b.....                                       | 72 |
| <b>Figure 37</b> : Modulation du complexe P3a et de la RON de l'enfance à l'âge adulte .....   | 75 |
| <b>Figure 38</b> : Représentation des principales méthodes utilisées pour la validation d'outils neuropsychologiques (liste non exhaustive).....                     | 88 |
| <b>Figure 39</b> : Organisation d'une matrice de corrélation utilisée pour mesurer la validité de construit grâce à la méthode "Multitrait-Multimethod Matrix" ..... | 92 |
| <b>Figure 40</b> : Représentation de l'organisation d'un réseau nomologique .....  | 92 |

## **Section II : Méthode**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure 41</b> : Illustration du paradigme CAT .....  | 98  |
| <b>Figure 42</b> : Illustration du paradigme CAT-EEG .....  | 99  |
| <b>Figure 43</b> : Représentation des TR en fonction de la condition du test CAT .....  | 102 |
| <b>Figure 44</b> : Représentation schématique du déroulement temporel des effets d'alerte phasique et de distraction engendrés par la survenue d'un distracteur dans le CAT ... | 103 |
| <b>Figure 45</b> : Schéma des différents types de réponses comportementales extraites et analysées suite à la réalisation du CAT par les participants.....                      | 105 |

## **Section IV : Approche méthodologique pour la validation du Competitive Attention Test**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figure 46</b> : Visual stimuli used as cues and feedback in the parallel version of the CAT (CAT B).....      | 229 |
| <b>Figure 47</b> : Schematic representation of the procedure used to assess the content validity of the CAT..... | 231 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure 48</b> : Schematic representation of the research procedure used in patients with ADHD..... | 236 |
| <b>Figure 49</b> : False and positive rates. ....   | 238 |
| <b>Figure 50</b> : Schematic representation of Receiver Operating Characteristics curves. .           | 239 |
| <b>Figure 51</b> : Indicators of data dispersion along a Gaussian curve .....                         | 241 |
| <b>Figure 52</b> : Experimenter interface of the CAT application .....                                | 243 |
| <b>Figure 53</b> : The CAT application report .....   | 244 |
| <b>Figure 54</b> : Details of the validity types assessed by the CAT validation procedure. ...        | 245 |

#### **Section IV : Discussion**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figure 55</b> : Effectifs actuels des populations testées lors des Etudes 1, 2 et de l'étude visant à compléter la base de données normative du CAT en fonction de l'âge.....             | 248 |
| <b>Figure 56</b> : Les temps de réaction au CAT et leur variabilité à travers l'âge .....  | 248 |
| <b>Figure 57</b> : Effet de facilitation et de distraction sur les temps de réaction à travers l'âge .....   | 249 |
| <b>Figure 58</b> : Proportion des différents types de réponses au CAT à travers l'âge. ....  | 249 |
| <b>Figure 59</b> : Représentation schématique des résultats comportementaux significatifs obtenus lors de l'Etude 1, 3 et l'étude visant à compléter la base de donnée normative du CAT..... | 253 |
| <b>Figure 60</b> : Taux moyen de réponses manquées au CAT, en fonction du distracteur, chez l'enfant de 6 ans .....  | 254 |



## **Liste des tableaux**

### **Section I : Introduction**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1</b> : Critères diagnostic du TDA-H Selon la cinquième version du DSM .....  | 78 |
| <b>Tableau 2</b> : Table de comparaison des sphères cognitives évaluées par le test CAT et d'autres tests attentionnels fréquemment utilisés en clinique (liste non exhaustive) .....  | 86 |
| <b>Tableau 3</b> : Table de comparaison des modalités pratiques de l'évaluation neuropsychologique via l'utilisation du test CAT et d'autres tests attentionnels fréquemment utilisés en clinique (liste non exhaustive) ..... | 86 |
| <b>Tableau 4</b> : Listes des mesures fournies par le test CAT.....  | 87 |

### **Section II : Méthode**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tableau 5</b> : Comparaison des différentes versions du paradigme CAT .....  | 100 |
| <b>Tableau 6</b> : Comparaison des différentes procédures utilisées dans les études mentionnées dans ce manuscrit.....          | 101 |
| <b>Tableau 7</b> : Mesures comportementales fournies par le CAT .....   | 106 |
| <b>Tableau 8</b> : Planned samples of participants for the test-retest procedure .....  | 230 |
| <b>Tableau 9</b> : Summary of the planned comparisons between the CAT and other neuropsychological measurements.....            | 234 |
| <b>Tableau 10</b> : Expected pattern of performances of ADHD patients to the CAT.....   | 237 |
| <b>Tableau 11</b> : Measurements of clinical interest provided by the CAT. ....   | 240 |
| <b>Tableau 12</b> : Results of the Shapiro tests performed to estimate the normality of the CAT measurement distributions ..... | 240 |

## ***Liste des acronymes***

**CAT** : Competitive Attention Test

**CNV** : Variation contingente négative (« Contingente Negative Variation »)

**EEG** : Electroencéphalographie

**IRM** : Imagerie par résonance magnétique

**LC** : Locus Coeruleus

**MSE** : milieu socio-economique

**P3a-l** : P3a précoce (« late P3a »)

**P3a-p** : P3a précoce (« early P3a »)

**PEA** : Potentiel évoqué auditifs

**PE** : Potentiel évoqué

**RON** : Négativité de réorientation (« Reorienting Negativity »)

**TDA-H** : Trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité

**TR** : Temps de réaction

*« La vie est une perpétuelle distraction qui ne vous laisse même pas prendre conscience de ce dont elle distrait. »*

Franz Kafka

Section I :

# Introduction

## Préambule

L'attention c'est ce détail qui vous frappe dans cet environnement pourtant si familier, cette personne que vous regardez plutôt qu'une autre parmi la foule, cette conversation que vous entendez si distinctement dans le bruit alentour, ou encore cette pensée qui vous traverse l'esprit et vous distrait pendant votre lecture. L'attention module la perception selon ou contre la volonté, de manière discrète et inconsciente. Son influence cognitive est ubiquitaire et contribue à la réalisation de tout objectif, qu'il s'articule sur le court ou le long terme. L'attention agit à chaque instant, à la fois sur un versant interne et externe, en accordant plus ou moins d'importance à ce que nous pensons ou percevons. En ce sens, notre expérience du monde est intrinsèquement définie par ce à quoi nous portons attention. William James, philosophe et psychologue américain durant la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, affirmait que nous savons tous ce qu'est l'attention. Mais l'expérience sensible et intuitive de l'attention est-elle véritablement suffisante pour cerner la nature de cette habileté de l'esprit ?

Les neurosciences cognitives suggèrent aujourd'hui que l'attention serait une fonction protéiforme et complexe. Depuis près de deux siècles, de nombreux chercheurs s'évertuent à mieux comprendre la nature de cette fonction cognitive sans pour autant s'accorder sur la définition de ses caractéristiques. Une des raisons poussant encore à étudier l'attention est que les répercussions comportementales et cérébrales des stimuli distrayeurs survenant dans l'environnement sont mal définies, ce notamment chez l'enfant. Le développement et l'intrusion brutale, à l'échelle de l'évolution, des nouvelles technologies dans notre société constitue un défi quotidien pour nos capacités attentionnelles. Dans cette ère du numérique, la problématique de l'attention s'avère particulièrement critique lorsqu'elle touche au développement de l'enfant. Les nouvelles technologies sont aujourd'hui pointées du doigt en raison de l'effet néfaste qu'elles pourraient avoir sur l'attention et les apprentissages. S'il est parfois difficile d'empêcher l'attention de se porter sur des distrayeurs qui se présentent à nous en tant qu'adulte (e.g. alertes de messagerie, musique ou annonces publicitaires diffusées dans les grands magasins), l'enfant présente visiblement des difficultés bien plus marquées pour se comporter de la sorte.

Si l'environnement peut être agencé en intérieur de sorte à minimiser les distrayeurs visuelles (e.g. réduction du nombre d'objets dans une pièce), il est plus difficile de minimiser les nuisances sonores car certaines sont parfois difficilement maîtrisables. En

ce sens, ce manuscrit aborde des notions relatives au fonctionnement attentionnel dans sa globalité, mais s'intéresse plus précisément à l'effet de distraction auditive. Si les sons non pertinents de notre environnement nous distraient parfois au point de nous gêner, l'enfant pourrait également souffrir de la survenue de sons non pertinents dans son environnement.

L'attention opère selon différents mécanismes cérébraux qui modulent rapidement et constamment notre comportement, souvent en deçà de toute expérience consciente. Si le traitement des informations sonores se fait de manière partiellement automatique, comment nous est-il donc possible de prioriser l'analyse de certains stimuli plutôt que d'autres ? Comment faisons-nous pour sélectionner les informations pertinentes pour la réalisation de nos actions tout en ignorant celles se présentant à nous mais n'ayant pas d'importance significative ? Si les distracteurs omniprésents sont nécessairement traités par le cerveau, ces traitements ne semblent toutefois pas impacter nos performances comportementales en toute circonstance. Certains bruits sont en effet plus à même de capturer notre attention si ces stimuli ou leur signification possède une importance particulière ou vitale (e.g. une alarme au feu). A ce jour, l'effet comportemental de la distraction auditive et la façon dont le cerveau traite les sons distracteurs au cours de l'enfance reste partiellement incompris.

De l'enfance à l'adolescence, le cerveau connaît des changements structurels et fonctionnels. La réaction cérébrale et comportementale aux distracteurs auditifs pourrait donc varier en fonction de l'âge. Déterminer ces standards réactionnels est notamment d'une importance cruciale dans le milieu clinique car ces derniers permettraient une amélioration du diagnostic des déficits attentionnels. A ce jour, et malgré l'impact conséquent que les stimuli non pertinents peuvent avoir sur notre comportement au quotidien, il existe peu de tests neuropsychologiques permettant d'évaluer les capacités attentionnelles dans la modalité auditive.

Pour mieux comprendre l'origine des différentes problématiques précédemment abordées, ce manuscrit propose tout d'abord de s'intéresser aux différents concepts et modèles théoriques liés à l'attention, puis d'explorer le développement des corrélats comportementaux et cérébraux sous-tendant les capacités de concentration et de résistance à la distraction, pour enfin aborder la problématique de la détection des dysfonctionnements attentionnels dans le milieu clinique. Dans son ensemble, ce manuscrit retranscrit le fruit d'un travail visant à caractériser le développement des marqueurs comportementaux et cérébraux de la distractibilité dans sa dimension normale et pathologique.

# Chapitre 1. Conceptualiser l'attention

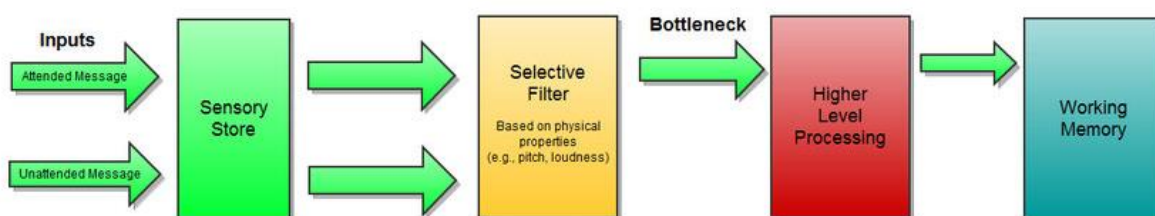
## 1.1. L'attention : modèles pionniers d'une fonction cognitive protéiforme

L'attention agit de sorte à nous permettre de créer une connexion avec autrui, un objet, une idée ou encore un ressenti. Elle joue un rôle crucial dans l'adaptation et le maintien des comportements déployés au quotidien. Si nous pensons tous, au premier abord, percevoir intuitivement ce que représente l'attention, il n'est pas étonnant de constater que l'introspection fût en premier lieu sa méthode d'étude privilégiée. Au 4<sup>ème</sup> siècle, Augustin d'Hippone, philosophe et théologien romain, mentionne déjà dans ses écrits l'importance de l'attention, il souhaite apprendre à ses lecteurs à être attentifs, tout en soulignant l'impact que les distractions peuvent avoir sur l'état de concentration. Au début du 17<sup>ème</sup> siècle en France, le mathématicien et philosophe René Descartes note qu'une idée peut nous apparaître plus distinctement lorsque l'attention se focalise sur cette même idée. Dans le domaine de la philosophie, l'étude de l'expérience sensible de l'attention a indéniablement contribué à ériger un socle de connaissances conceptuelles visant à caractériser cette fonction cognitive. Toutefois, l'aspect subjectif de l'introspection entrave nécessairement l'étude des fonctions mentales opérant hors de la conscience : la compréhension subjective de l'attention s'est ainsi heurtée à la limite de l'expérience sensible.

Dans le domaine de la psychologie, l'attention peut aujourd'hui être définie comme « l'activité, ou l'état, par lequel un sujet augmente son efficacité à l'égard de certains contenus psychologiques (perceptifs, intellectuels, mnésiques), le plus souvent en sélectionnant certaines parties ou certains aspects et en inhibant ou négligeant les autres ». Cette sélection peut toutefois opérer différemment selon le contexte environnemental et les propriétés physique de ses constituants. A ce jour, et même s'il n'existe pas de consensus concernant la définition précise de sa nature, l'attention serait une fonction multiple qui pourrait opérer de manière sélective, divisée, soutenue, volontaire ou involontaire, ce indépendamment de la modalité sensorielle concernée.

Durant la seconde guerre mondiale, l'armée anglaise chargea les plus éminents psychologues britanniques d'étudier l'attention pour essayer d'améliorer la performance de travail de leurs contrôleurs aériens. C'est de cette opportunité d'étude que découle notamment l'apparition de la théorie du filtrage attentionnel proposée par Donald Broadbent (Broadbent, 1958). La théorie du filtrage attentionnel repose sur les résultats

d'études utilisant des paradigmes expérimentaux dits d'écoute dichotique, où deux stimuli auditifs sont simultanément présentés dans les oreilles droite et gauche d'un individu. Broadbent suggéra que l'attention procéderait comme un filtre contrôlant l'entrée, dans le cerveau, des informations pertinentes de l'environnement. Broadbent développe une conception du traitement humain de l'information fondée sur une analogie informatique : la perception, l'attention et la mémorisation sont conçues comme des étapes successives d'un système de traitement dépendant de ressources cognitives limitées. Broadbent suppose qu'il existerait deux étapes de traitement de l'information environnementale : la première étape renvoie aux traitements rapides et simultanés de canaux parallèles contenant les informations sensorielles, tandis que la seconde réfère à un canal unique possédant une vitesse et une capacité de traitement limitées, mais offrant une importante précision de traitement. La seconde étape de traitement ne pourrait s'appliquer qu'à un seul canal sensoriel à la fois ; en ce sens, le passage d'une information sensorielle de la première à la seconde étape de traitement équivaut ici à engager son attention sur cette information. Au sein de ce modèle, la mémoire à court terme jouerait un rôle de « buffer » au sein duquel seraient temporairement stockées des informations sensorielles accessibles suite à la seconde étape de traitement attentionnel (Fig. 1). Selon Broadbent, l'information non pertinente et non sélectionnée peut être mise en attente pendant une très courte période, mais disparaît si elle n'est pas volontairement utilisée. Cette théorie fut la première à concevoir l'attention comme une fonction cognitive ayant pour but premier de sélectionner et de focaliser l'attention sur une source sensorielle tout en inhibant le traitement d'autres sources concurrentes. Cette première forme de l'attention officiellement modélisée réfère donc à la caractéristique sélective de la fonction attentionnelle.



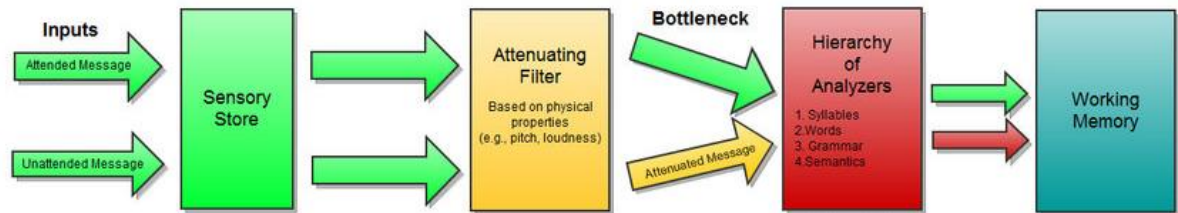
**Figure 1** : Modèle de l'attention de Broadbent (Atmaja, 2019). Les informations contenues dans le « buffer » sensoriel (vert) sont filtrées par l'attention (jaune). Seules les informations pertinentes préalablement sélectionnées par l'attention sont analysées à un plus haut niveau (rouge) pour être finalement stockées en mémoire de travail (bleu).



Malgré son intérêt crucial, le modèle pionnier d'attention sélective de Broadbent rencontre rapidement deux principales limites : premièrement, il implique que l'information non pertinente filtrée ne peut plus être traitée, or certains résultats expérimentaux suggèrent une possibilité de traitement de cette information sur la durée (Moray, 1959); deuxièmement, il ne parvient pas à expliquer le fait que des mots ayant une importance sémantique particulière (par exemple le nom propre d'un individu) puissent être instantanément sélectionnés par l'attention alors qu'ils transitent théoriquement dans des canaux de traitement non prioritaires (Lewis, 1970). La première observation suggère que les informations non pertinentes de l'environnement ne seraient pas simplement occultées suite au filtrage attentionnel. Quant à la seconde, elle renvoie à la temporalité d'action de la sélection attentionnelle : à quel niveau de traitement de l'information sensorielle opère donc le filtre attentionnel ? Le modèle de Broadbent suggère que la sélection attentionnelle de l'information qui doit être traitée par le système se produit nécessairement de manière très précoce car l'existence d'un canal unique de traitement contraint fortement la capacité du système cognitif.

Une explication à l'inconsistance entre le modèle théorique de Broadbent et les observations expérimentales susmentionnées est proposée par Anne Treisman en 1960. Cette psychologue cognitive propose une théorie visant à sophistication le modèle original de Broadbent. Dans sa théorie dite de l'atténuation, le filtre attentionnel atténuerait le traitement des informations sensorielles non pertinentes mais ne les bloquerait pas totalement (Fig. 2). En ce sens, les informations liées aux messages sensoriels non pertinents pourraient donc être temporairement stockés pour une utilisation ultérieure. Ce modèle avance également que la reconnaissance d'un mot dépend de l'intensité de son seuil d'activation. D'après le modèle de Treisman, chaque stimulus posséderait un seuil d'activation ; la sélection attentionnelle d'une information sensorielle dépendrait du seuil d'activation de cette information. Là où Broadbent propose un filtrage bloquant basé sur les propriétés physiques des stimuli, Treisman avance que le filtrage atténuerait l'activation des traitements sensoriels en fonction des propriétés physiques et sémantiques des stimuli. La sélection attentionnelle se ferait ainsi par l'intermédiaire de mécanismes de filtrage bloquant les stimuli qui, de par leurs caractéristiques physiques et sémantiques, seraient jugés non pertinents par l'individu. En revanche, les informations à pertinence modérée pourraient être gardées en mémoire à court terme en vue d'une utilisation future. Pour expliquer ce mode de fonctionnement, Treisman et ses collaborateurs (Treisman & Gormican, 1988; Treisman & Souther, 1985) proposent qu'il existerait deux étapes dans le processus de sélection attentionnelle. La première serait la

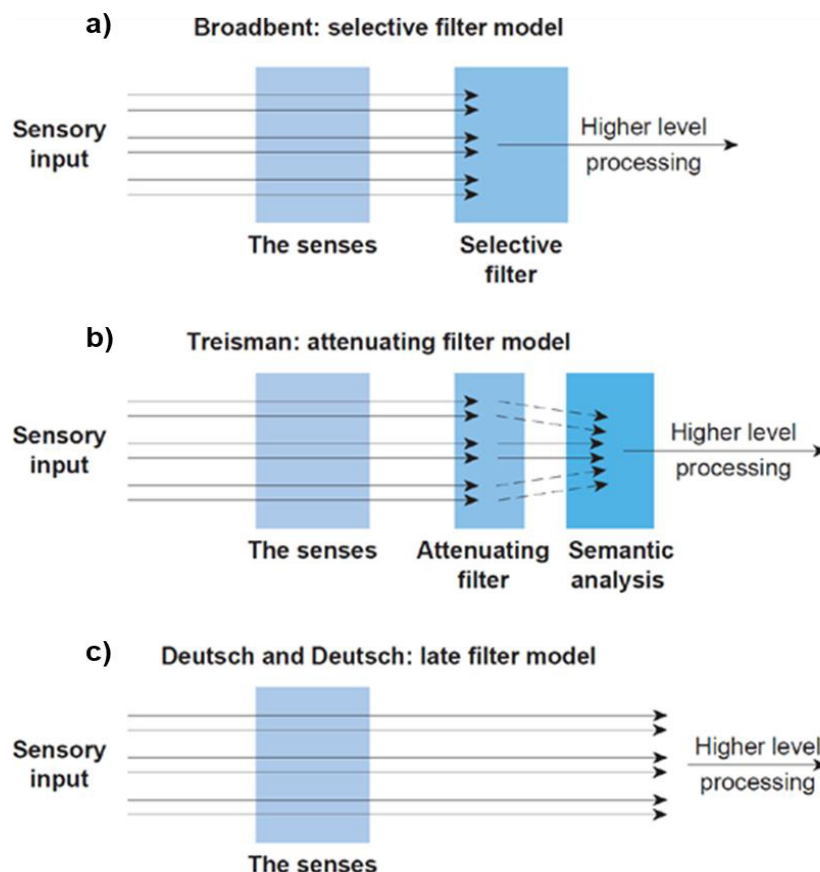
sélection automatique et parallèle des stimuli au regard des leurs caractéristiques propres, tandis que la seconde serait de nature plus contrôlée et dépendrait des buts actuels et connaissances antérieures de l'individu.



**Figure 2** : Modèle de l'attention de Treishman (Atmaja, 2019). Les informations contenues dans le « buffer » sensoriel (vert) sont filtrées par l'attention (jaune). Les informations non pertinentes sont atténuées par l'attention et sont analysées, avec les informations pertinentes non atténuées, à un plus haut niveau (rouge) pour être finalement stockées en mémoire de travail (bleu).

Les théories de Broadbent et Treisman ont permis de poser le socle de la définition de l'attention dans sa forme sélective. Cette forme attentionnelle permet la sélection, dans l'environnement, des informations devant être traitées en priorité par le système cognitif ; ce dernier dépendrait en effet de capacités limitées ne permettant pas le traitement systématique et approfondi de la totalité des stimuli de l'environnement. La sélection attentionnelle se ferait donc avant l'identification d'un stimulus cible. En 1963, Deutsch et Deutsch proposent au contraire que la sélection attentionnelle se ferait à un niveau plus tardif du traitement, et ce suite à l'identification préalable du stimulus (Fig. 3). Cette théorie dite de la sélection tardive présuppose elle aussi qu'il existerait deux étapes de traitement attentionnel : une première automatique et une seconde contrôlée. En revanche, les informations non pertinentes qui dépasseraient le processus de filtrage ne seraient pas sélectionnées pour être traitées de manière prioritaire. Cette proposition s'appuie notamment sur les résultats d'études utilisant le paradigme de Stroop (Mcleod, 1977). Dans la version originale de cette tâche, le participant doit dénommer la couleur d'impression d'un mot qui, lui-même, désigne une couleur. Bien que la signification du mot imprimé soit non pertinente, les participants sont plus rapides pour dénommer la couleur d'impression d'un mot quand sa signification est congruente avec cette couleur (e.g. mot « bleu » imprimé en bleu) que lorsqu'elle ne l'est pas (e.g. le mot « bleu » imprimé en vert). Cependant, l'effet perturbateur de l'incongruence s'estompe si les mots ne réfèrent plus à des couleurs, mais à d'autres objets ou concepts (e.g. mot « voiture » imprimé en vert). La théorie de la sélection tardive avance ainsi que, pour pouvoir perturber la réponse

motrice, l'information non pertinente doit avoir été préalablement identifiée. Ces suppositions furent également étayées par les résultats d'études utilisant des tâches d'écoute dichotique (Corteen & Wood, 1972; Lewis, 1970). Les travaux de Deutsch et Deutsch (1963) s'intéressèrent plus particulièrement à la capacité de gestions des ressources cognitives lors de la sélection attentionnelle. Leur théorie suggère que chaque canal de traitement possèderait une quantité propre de ressources limitées. Ceci présuppose que, lors de la réalisation simultanée de deux activités, la stratégie de gestion des ressources pourrait être indépendante pour chaque tâche : en ce sens, la théorie de la sélection tardive suggère qu'il ne peut donc pas se produire d'interférences entre ces deux tâches si leurs natures sont différentes. En revanche, si les deux tâches réalisées empruntent le même canal de traitement en raison de la similarité de leur nature, alors il est possible de prédire une détérioration des performances pour la réalisation des deux tâches car toutes deux dépendront alors du même système d'allocation de ressources.



**Figure 3** : Comparaison simplifiée des modèles pionniers de la sélection attentionnelle. **a**, Modèle de Broadbent, **b**, Modèle de Treishman, **c**, Modèle de Deutsch et Deutsch.

Si la théorie de la sélection tardive permet de mettre en évidence la prédisposition de l'attention à se diviser pour gérer parallèlement plusieurs objets, elle rencontre toutefois deux limites fondamentales : lors de tâches d'écoute dichotique, il ne semble pas être possible de rester complètement attentif à deux flux d'informations sonores lorsqu'ils sont perçus simultanément (Treisman & Riley, 1969; Underwood, 1977) ; de plus, les résultats d'études mesurant l'activité cérébrale en utilisant l'électroencéphalographie (EEG) suggèrent que l'attention sélective pourrait précocement moduler les traitements sensoriels (Hillyard et al., 1973a). La théorie de la sélection précoce stipule que la discrimination des informations pertinentes et non pertinentes se fait sur la base des caractéristiques fondamentales des stimuli, comme leur position spatiale, leur forme ou encore leur couleur (Broadbent, 1958; Kenemans et al., 1995; Näätänen, 1992; Wijers et al., 1989), tandis que la théorie de la sélection tardive suggère une catégorisation des stimuli en fonction de leur degré de ressemblance physique ou sémantique avec la cible (Deutsch & Deutsch, 1963; Glucksberg & Cowen, 1970; Jong et al., 1988; D. Norman, 1969; Norman & Shallice, 1986; Sullivan, 1976). Ces deux théories sont toutes deux étayées par des résultats comportementaux et en électrophysiologie alors qu'elles semblent pourtant s'opposer. Mais sont-elles réellement exclusives ? Kahneman et Treisman (1984) notèrent que l'effet Stroop disparaissait lorsque le nombre de stimuli présents dans l'environnement visuel augmentait. Ceci conduisit Lavie à proposer, en 1995, une théorie dite de la charge perceptive, avançant que les mécanismes de sélection précoces et tardifs seraient enclenchés lorsque la charge perceptive liée à la tâche serait respectivement importante ou faible (Lavie, 1995; Lavie & Dalton, 2014).

L'ensemble de ces travaux pionniers s'attachant à définir la nature de l'attention ont permis de distinguer certaines de ses caractéristiques fondamentales. L'attention est une fonction cognitive dont l'utilité première serait la sélection des informations pertinentes de l'environnement. Cette sélection pourrait se produire à des stades plus ou moins tardifs du traitement sensoriel en fonction de la charge cognitive et perceptive intrinsèque ou extrinsèque à la tâche. En ce sens, les différentes théories évoquées dans cette section s'accordent à penser que l'attention dépendrait de ressources limitées alimentant deux types de processus de sélection attentionnelle : les premiers sont involontaires, automatiques, et consommeraient peu de ressources ; les seconds sont volontaires et contrôlés, mais leur exécution nécessiterait une quantité importante de ressources disponibles. Cependant, ces travaux ne permettent pas de déterminer comment et sous quelles conditions l'information non pertinente parvient à perturber les traitements attentionnels contrôlés. Cette question motive intrinsèquement tout travail de recherche

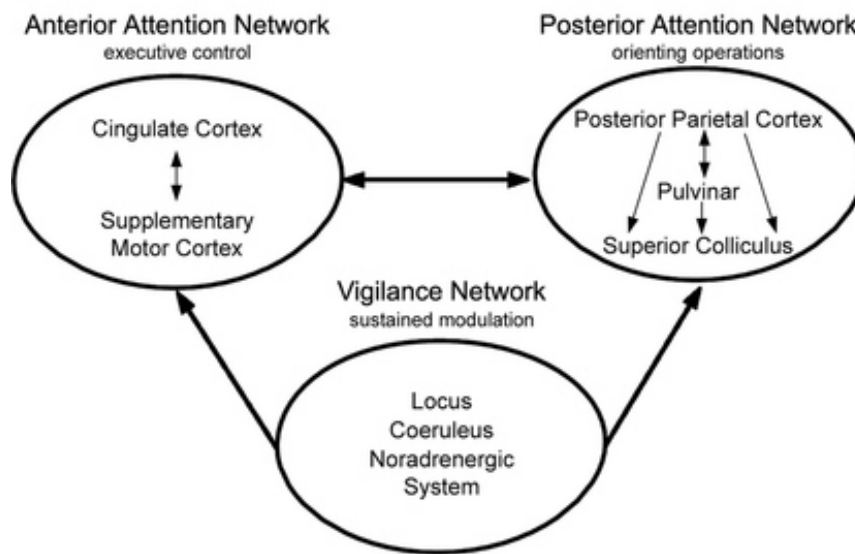
portant sur la distraction et, plus largement, sur la distractibilité. Le bref historique des premiers modèles pionnier de l'attention qui a été fait ici visait donc à apporter les bases fondamentales permettant de conceptualiser l'attention. Pour comprendre ce qu'est précisément la distractibilité et comment elle peut évoluer au cours du développement, la suite de ce manuscrit propose une revue préalable des processus attentionnels contribuant à la distractibilité.

## 1.2. Le contrôle volontaire de l'attention

### *i. Engagement, désengagement, déplacement et anticipation attentionnelle*

La capacité à orienter efficacement l'attention vers des éléments pertinents pour la réalisation d'un objectif est cruciale lorsqu'il s'agit de rester concentrer sans se laisser distraire. En 1980, Michael Posner, psychologue américain, développe un nouveau modèle de la sélection attentionnelle visuo-spatiale tenant compte de la dichotomie entre processus volontaires et involontaires. Sa théorie stipule que l'attention volontaire, endogène (aussi dite 'Top-Down'), optimise le traitement de l'information sensorielle selon les objectifs de l'individu ; porter volontairement attention à une tâche spécifique permet d'une part de sélectionner les informations externes ou internes pertinentes pour sa réalisation, mais également de se préparer à percevoir ces informations pour y répondre de manière optimale. L'attention peut également être capturée involontairement par un stimulus, saillant ou, et ainsi être ponctuellement désengagée de la tâche en cours. Cette forme involontaire, exogène (aussi dite 'Bottom-Up'), de l'attention est nécessaire pour pouvoir réagir à un évènement potentiellement important mais non pertinent pour ce qui est en train d'être accompli. La plausibilité du mode de fonctionnement attentionnel décrit dans le modèle de Posner a convaincu non seulement les psychologues mais aussi les neuroscientifiques s'intéressant à des populations humaines ou animales. L'apport du modèle de Posner à la compréhension de l'attention a été fondamental, et sert toujours de pilier théorique à de nombreux travaux dans le domaine des neurosciences cognitives. Ce modèle a créé une rupture idéologique à l'époque de son émergence : alors que tous les autres modèles conceptualisaient l'attention comme une seule et même entité cognitive, Posner propose qu'elle serait, au contraire, modulaire (Posner, 1980).

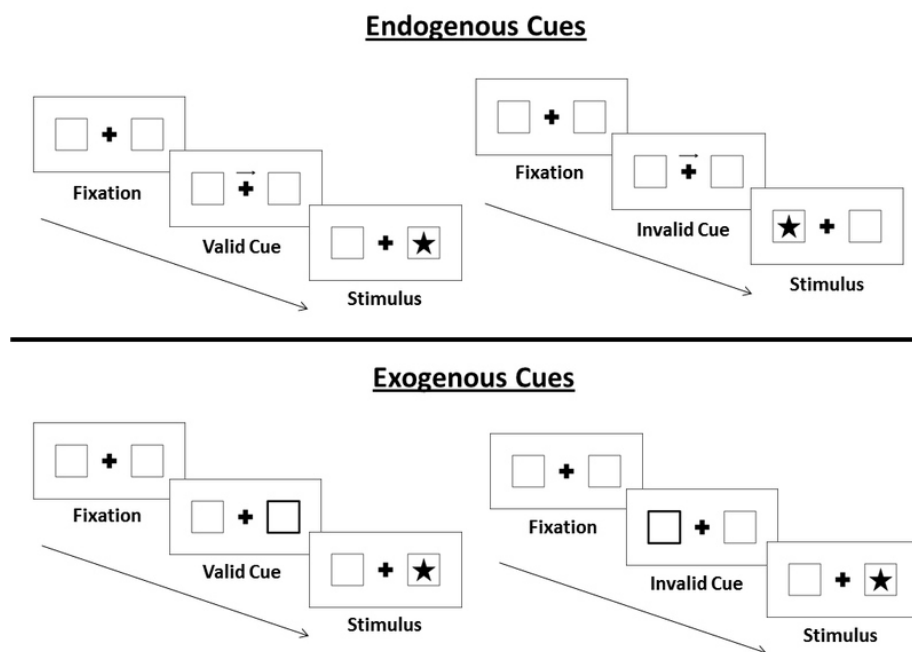
Le modèle de Posner distingue en effet trois systèmes attentionnels : l'orientation attentionnelle, qui contribue à la sélection d'information dans l'environnement, le contrôle exécutif sélectionnant et contrôlant pour sa part la chaîne de traitements permettant de réaliser une tâche donnée, et enfin l'alerte qui module le niveau de vigilance (Fig. 4).



**Figure 4 :** Les systèmes attentionnels selon Posner et leur corrélats neuroanatomiques (Gitelman, 2003). Le système d’alerte (vigilance network influence le système d’orientation de l’attention (posterior attention network) et de contrôle exécutif (anterior executive control) ; les systèmes d’orientation attentionnelle et de contrôle exécutif interagissent également entre eux.

Le paradigme de détection de Posner comporte des conditions expérimentales permettant notamment de mesurer l’attention volontaire. Ce type de paradigme, présente généralement trois types d’essais : les premiers comportent un indice non-informatif renseignant sur la survenue prochaine d’une cible mais n’indiquant pas sur sa position spatiale, suivi d’un délai, et de l’apparition du stimulus cible (condition neutre) ; les seconds comportent un indice informatif indiquant la position spatiale de la cible à venir, suivi d’un délai et l’apparition de la cible (condition valide) ; enfin, les derniers comportent un indice informatif qui oriente l’attention dans la portion de l’espace opposée à celle où apparaîtra la future cible (condition invalide). Dans la version classique de ce paradigme, l’intervalle entre l’apparition de l’indice et de la cible peut être de différentes durées fixes (0 [pas d’indice avant la cible], 50, 150, 300, 500 ou 1000 ms). L’expérience comporte 50% d’essais non-informatifs et 50% d’essais informatifs ; au sein de cette dernière catégorie 80 % des indices sont valides, tandis que les 20% restant sont invalides (Posner, 1978). Les indices utilisés dans cette version princeps du paradigme sont de nature endogène et correspondent à une croix en condition neutre et à une flèche pointant à droite ou à gauche en conditions valide et invalide (Fig. 5). Un indice endogène sollicite le déploiement de processus volontaires contrôlés en accord avec les objectifs mentaux d’un individu. Lors de la perception d’une flèche pointant soit à droite soit à gauche, le participant peut inférer la future position spatiale de la cible et orienter volontairement son attention sur cette

position. Ce déploiement attentionnel volontaire permet au participant de se concentrer sur la position spatiale de la future cible pour se préparer à y répondre le plus efficacement possible. Des versions ultérieures de cette tâche proposée par Posner et ses collaborateurs s'appuient par ailleurs sur des indices de type exogène : l'indice consiste ici à illuminer brièvement un item au centre de l'écran en condition neutre, ou à illuminer directement un item dont la position spatiale est congruente avec celle de la future cible en condition valide, ou incongruente en condition invalide. Cette manipulation expérimentale permet d'orienter involontairement et automatiquement l'attention vers une position spatiale.

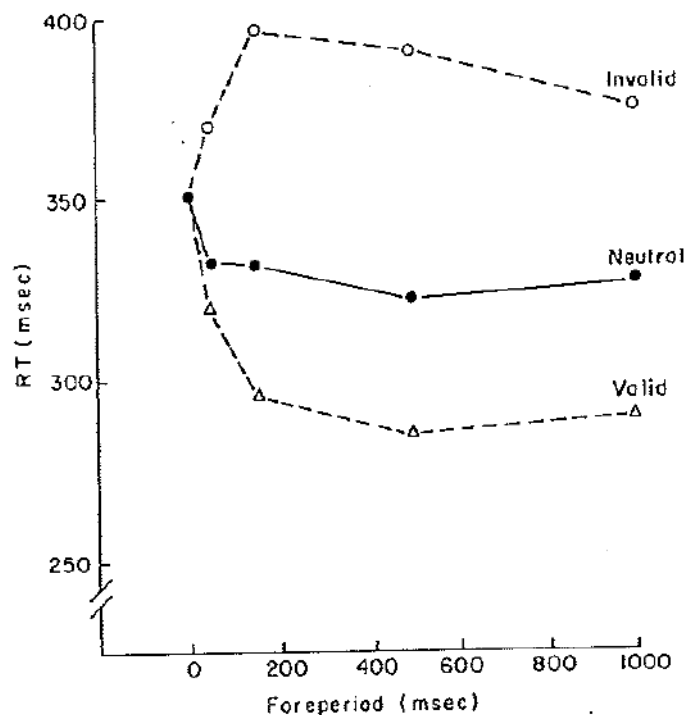


**Figure 5** : Illustration du déroulement des essais dans une tâche de type Posner pour des conditions d'amorçage endogènes (a) et exogènes (b), ainsi que pour des indices valides (à gauche) et invalides (à droite) ("Posner Cueing Task," 2020).

Durant le test, le participant a pour consigne de détecter le plus rapidement possible les cibles visuelles dès que celles-ci apparaissent à l'écran. Lorsque le délai indice-cible est inférieur à 300ms, les temps de réaction (TR) des participants sont plus rapides en condition valide qu'en condition neutre, et sont plus lents en condition invalide qu'en condition neutre et valide. Ces résultats expérimentaux reflètent la capacité de l'attention à s'orienter dans l'espace. La réduction significative des TR lors des essais comportant un indice valide plutôt qu'un indice neutre suggère que l'attention peut être volontairement engagée sur



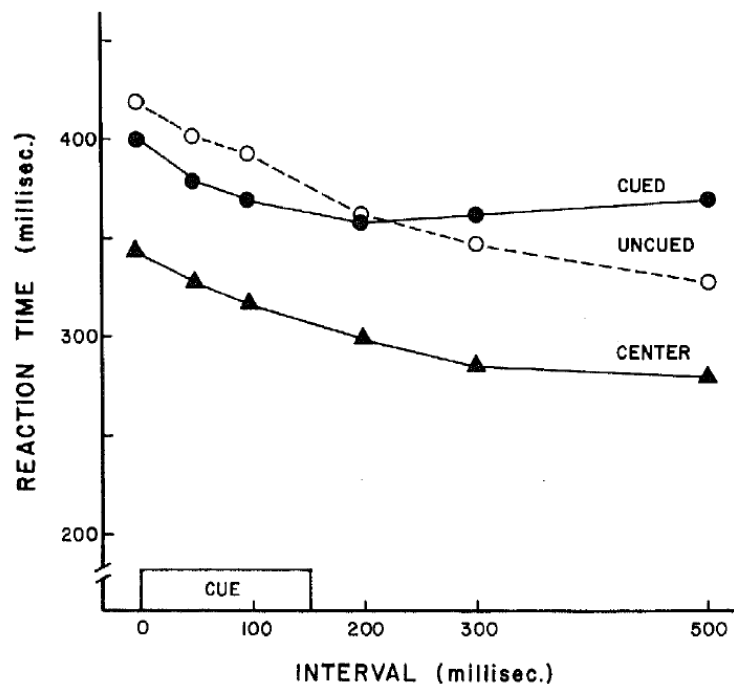
la position spatiale de la cible pour faciliter sa détection. En outre, l'augmentation des RT en condition invalide comparé aux conditions neutre et valide laisse penser que l'attention, lorsqu'elle est engagée sur une position spatiale - qui n'est pas celle de la future cible - doit inhiber la facilitation en cours pour se désengager de sa position actuelle : l'activation des mécanismes d'inhibition permettant le désengagement attentionnel se traduirait donc par un coût comportemental. Dans les versions des tâches de Posner s'appuyant sur l'utilisation d'indices endogènes, ces différents effets comportementaux sont observables pour un intervalle indice-cible de 50 à 1000ms (Posner, 1978) (Fig. 6).



**Figure 6** : Temps de réaction en fonction de l'intervalle entre l'indice et la cible dans une tâche de Posner comportant des indices endogènes invalides (ligne supérieure), neutres (ligne médiane) et valide (ligne inférieure) (Posner, 1978).

Dans les version utilisant un indice exogène, et lorsque l'intervalle indice-cible est compris entre 300 et 1600ms, la réduction de TR en condition valide comparé à la condition invalide disparaît (Posner, 1978). En d'autres termes, lorsque l'attention est orientée involontairement vers une position spatiale, le bénéfice comportemental de l'amorçage s'estompe lorsque la cible apparaît plus de 300ms après l'indice (Fig. 7). Ce phénomène s'expliquerait par la tendance de l'attention à optimiser sa recherche de cible : après s'être engagée sur une position spatiale pendant un certain temps, l'attention se désengagerait automatiquement pour explorer l'espace alentour, ceci réduisant donc la

facilitation directe du traitement de la cible, et par là même le bénéficie en TR induit par l'indice. Ce phénomène est désigné sous le terme d'inhibition de retour. Selon Posner, ce phénomène s'explique par l'action de mécanismes attentionnels facilitateur et inhibiteur. La composante facilitatrice de l'attention involontaire serait dominante durant les 200 ms suivant l'apparition de l'indice, tandis que la composante inhibitrice s'imposerait plus tardivement durant une période allant de 300 à 3000 ms. Ce processus d'inhibition serait réflexif et incontrôlé, et se mettrait en place uniquement dans le cas de l'orientation attentionnelle involontaire. Pris dans leur ensemble, ces observations étayent l'existence d'une dissociation fonctionnelle entre orientation volontaire (endogène) et involontaire (exogène) de l'attention.



**Figure 7 :** Temps de réaction en fonction de l'intervalle lors de la détection d'une cible périphérique précédée d'un indice (CUED), non précédée d'un indice (UNCUEd), ou d'une cible centrale non précédée par un indice (CENTER) (Posner et al., 1984). L'effet de l'inhibition de retour est visible pour un délai égal et supérieur à 300ms.

En dépit de leur dissociation fonctionnelle, l'orientation attentionnelle volontaire et involontaire seraient toutes deux dépendantes de l'action de mêmes types de mécanismes : l'engagement attentionnel, reposant sur des mécanismes facilitateurs, et le désengagement reposant pour sa part sur l'action de mécanismes inhibiteurs. Si l'attention est capable de se déplacer de manière automatique dans l'espace, le déclenchement des mécanismes de facilitation et d'inhibition permet toutefois de contrôler son orientation.

L'engagement attentionnel permet ainsi de focaliser l'attention en un point donné de l'espace, tandis que le désengagement libère l'attention de son encrage spatial, autorisant ainsi son déplacement automatique et l'exploration de nouvelles positions. L'engagement et le désengagement attentionnel entrent donc systématiquement en jeu lors du déploiement attentionnel, qu'il soit volontaire ou involontaire. Il est toutefois important de noter que, dans les tâches de détection de Posner, l'indice exogène est un stimulus pertinent qui, certes, capture l'attention, mais qui ne peut toutefois pas être considéré comme un élément distracteur puisqu'il est porteur d'une information pertinente pour la réalisation de la tâche. Les tâches de Posner permettent donc de mesurer l'orientation exogène de l'attention vers un objet pertinent (i.e. la position spatiale d'une cible) - et non l'orientation exogène vers un objet non pertinent (i.e. un élément non pertinent, distracteur, de l'environnement).

Les travaux ultérieurs de Posner et ses collaborateurs ont notamment permis d'identifier les corrélats neuronaux des mécanismes d'engagement, de désengagement et de déplacement attentionnels volontaires. L'étude des performances comportementales de patients présentant des lésions cérébrales<sup>1</sup> et celle de l'activité cérébrale chez l'homme et l'animal ont fortement contribué à identifier les structures supportant ces trois mécanismes. Le pulvinar, un noyau thalamique contribuerait ainsi principalement à l'engagement attentionnel (Fiebelkorn et al., 2019; Posner & Rafal, 1987), le cortex pariétal au désengagement (Fiebelkorn et al., 2019; Posner et al., 1984; Posner & Rafal, 1987; Rushworth et al., 1997; Shomstein, 2012) tandis que le colliculus supérieur jouerait un rôle majeur dans le déplacement de l'attention (Bogadhi et al., 2018; Ignashchenkova et al., 2004; Krauzlis et al., 2013; Posner et al., 1982).

Le modèle de Posner propose que la sélection attentionnelle dépende de trois sous-systèmes distincts : l'orientation, le contrôle exécutif et l'alerte. Selon sa théorie, le contrôle exécutif permettrait pour sa part la gestion des ressources cognitives nécessaires au fonctionnement attentionnel volontaire ; les processus involontaires, quant à eux, consommeraient très peu de ressources cognitives et ne dépendraient donc pas du contrôle exécutif (Rueda et al., 2015; Schneider & Shiffrin, 1977). Le contrôle exécutif est impliqué dans la détection consciente, l'inhibition et la résolution de conflits entre les différents processus de traitement au sein du cerveau comme le dénote l'effet Stroop

---

<sup>1</sup> Renvoie à la méthode de la neuropsychologie clinique. Selon Hécaen, la neuropsychologie est « la discipline qui traite des fonctions mentales supérieures dans leur rapport avec les structures cérébrales » (1972). En cela, la neuropsychologie clinique est une discipline transdisciplinaire. Cette spécialité vise à mieux comprendre les relations entre les altérations cérébrales et celles du comportement

(Posner & DiGirolamo, 1998). Ce sous-système dépend d'un réseau cérébral s'étendant du cortex frontal médian au cortex cingulaire antérieur (Pardo et al., 1990; Petersen & Posner, 2012).

Enfin, dans le modèle de Posner, l'alerte fait référence au niveau de vigilance. La notion de vigilance renvoie elle-même à l'état de l'organisme conditionnant la capacité de réaction ; elle est intrinsèquement liée à la conception de l'attention dans sa dimension d'intensité. L'état de vigilance dépend de deux types de mécanismes physiologiques : l'alerte tonique (tonic arousal) assurant un état d'éveil stable fluctuant à basse fréquence, et l'alerte phasique (phasic arousal) induisant des fluctuations à haute fréquence de l'état d'éveil. Certains travaux réalisés dans les années 1970, Näätänen (Naatanen, 1970; Näätänen, 1972) montre que, pour une même tâche, l'augmentation de la probabilité d'apparition de la cible à travers les essais est négativement corrélée aux TR des participants pour détecter cette même cible. Autrement dit, plus il est probable que la cible soit présentée à la fin d'un essai, plus les participants seront rapides pour y répondre. Ce phénomène de facilitation serait lié à une augmentation du niveau d'alerte tonique. Ainsi, lors d'une tâche de Posner, le contraste des TR mesurés pour des blocs lors desquels l'apparition d'une cible suit systématiquement ou rarement la présentation de l'indice, permet d'évaluer l'effet de l'alerte tonique sur les performances attentionnelles générales. Par ailleurs, Posner et ses collaborateurs proposent qu'une augmentation transitoire de l'alerte phasique se produit systématiquement suite à l'occurrence d'un stimulus avertissant la future apparition d'une cible à détecter (i.e. un indice) (Posner & Rafal, 1987). Les variantes du paradigme de Posner comportant des cibles précédées, ou non, par un indice permet de mesurer l'effet de l'alerte phasique sur les performances comportementales. Pour cette tâche, et en contrastant les TR obtenus dans les conditions avec et sans indice, Posner et ses collaborateurs observent une augmentation systématique des TR lorsque la cible n'est pas précédée d'un indice. Cette observation suggère que l'alerte phasique faciliterait le traitement attentionnel de la cible. De plus, l'utilisation d'intervalles indice-cible de durée différente lors de ce même type de tâche a permis de préciser le décours temporel de l'effet facilitateur de l'alerte phasique sur les TR. Suite à l'apparition de l'indice, l'alerte phasique engendrerait une facilitation comportementale observable à partir de 100ms ; cette effet facilitateur augmenterait ensuite et permettrait un bénéfice comportemental maximum 500 à 1000ms suivant l'apparition de l'indice (Posner & Boies, 1971).

Ces systèmes et leurs corrélats neuraux seront abordés plus en détails dans la suite de ce manuscrit. D'un point de vue théorique, l'inclusion d'un sous-système d'alerte au sein du système attentionnel contribue à expliquer les variations temporelles d'intensité de l'état de concentration : la capacité d'un individu à soutenir son attention dépendrait ainsi directement de son niveau basal de vigilance. La démonstration expérimentale des effets de l'alerte tonique et phasique sur le fonctionnement attentionnel par Posner et ses collaborateurs marqua une avancée majeure dans la compréhension du fonctionnement de l'attention. En ce sens, la majorité des travaux de recherche contemporains visant à modéliser l'attention intègrent nécessairement une composante relative aux phénomènes d'alerte, et part la même, à l'intensité de l'attention (e.g. van Zomeren & Brouwer, 1994)

Suite à l'orientation et l'engagement de l'attention, son maintien sur le court terme (de l'ordre de la seconde) sur une position spatiale permet d'anticiper la survenue d'une cible pour y répondre de manière plus réactive. Si Posner note que l'effet bénéfique d'un indice exogène sur les TR en condition valide comparée à une condition invalide disparaît lorsque l'intervalle indice cible dépasse 300 ms, le bénéfice comportemental induit par un indice endogène persiste au-delà de 1000ms en condition valide comparée aux conditions neutre et invalide. Ceci suggère qu'il existerait des mécanismes cérébraux d'anticipation volontaire dont le déclenchement relativement tardif permettrait de mobiliser durablement et efficacement l'attention selon les motivations endogènes de l'individu (Posner et al., 1984). En faisant varier le délai indice-cible et la proportion d'essais invalides présentés durant des tâches de détection de type Posner ou semblables, plusieurs études comportementales ont en effet montré que l'effet bénéfique de l'indice sur les TR à la cible est observable pour des délais indice-cible allant jusqu'à 2000 ms (Posner, 1978). Ensemble, les mécanismes d'orientation et d'anticipation attentionnelle permettent ainsi l'amélioration des performances comportementales dans des tâches ne comportant pas de stimuli distracteur.

## 1.3. Capture involontaire de l'attention

### *i. Saillance*

La saillance fait référence à la faculté qu'ont certains objets à retenir l'attention par le biais de caractéristiques spécifiques. Différents modèles, tant dans le domaine de l'attention visuelle qu'auditive, ont été proposés pour expliquer le phénomène de la capture attentionnelle automatique par des éléments saillants. D'après Duncan et Humphreys (1989) et Theeuwes (1992), un stimulus est considéré comme saillant si plusieurs conditions sont réunies : il diffère, à un certain degré, des stimuli voisins sur une dimension physique, tandis que ces derniers sont relativement homogènes sur cette dimension ; la saillance d'un stimulus peut également être déterminée par sa rareté, autrement dit, lorsque la faible fréquence d'apparition de ce stimulus contraste avec la forte fréquence d'occurrence de ses voisins. Dans la modalité visuelle, différents paramètres tel que la forme, la couleur ou encore l'orientation du stimulus contribuent à déterminer son degré de saillance ; par contraste, d'autres caractéristiques comme la fréquence, le timbre ou le niveau sonore sont utilisées dans le domaine auditif. La majeure partie des études portant sur la saillance s'appuient sur le concept de carte de saillance proposée par Koch & Ullman (1985). À l'origine de cette idée se trouve la description de l'architecture du système visuel en régions cérébrales sous-tendant des cartes cognitives<sup>2</sup> spécialisées dans le traitement des caractéristiques perceptives des stimuli. Les entrées sensorielles seraient ainsi traitées en parallèle, puis encodées de manière ségréguée au sein de différentes cartes, toutes relatives aux traits physiques ou sémantiques des stimuli. L'activité dans la carte de saillance ne se ferait pas par sommation stricte de l'intensité des activations produites par les stimuli au sein des cartes de traits, mais par le contraste de ces activations (Beck & Kastner, 2005; Burrows & Moore, 2009; Huang & Elhilali, 2017; Hubel & Wiesel, 1959; Kayser et al., 2005; Treue, 2003) .

Si dans le domaine de l'attention visuelle il est aisé de mesurer objectivement la saillance d'un stimulus en utilisant des techniques telle que l'eye-tracking, il n'existe toutefois pas d'outil similaire dans le domaine auditif. Déterminer le niveau de saillance d'un son nécessite ainsi la comparaison de mesures objectives de saillance (comportement et imagerie cérébrale) à d'autres plus subjectives (questionnaires). En ce

---

<sup>2</sup> Concept attribué à E. Tolman (1948) renvoyant aux représentations mentales que se fait un individu pour comprendre et appréhender son environnement physique. Dans le cadre présent, les cartes cognitives permettent plus particulièrement la modélisation des liens qu'entretiennent mutuellement différents groupes de neurones ou aires cérébrales pour permettre à l'individu d'analyser son environnement.

sens, la question de la saillance dans le domaine des neurosciences cognitives s'avère très majoritairement documentée dans la modalité visuelle. Indépendamment de la modalité sensorielle concernée, différents travaux réalisés notamment chez le primate et l'humain ont permis de mettre en lumière l'influence de la saillance sur le comportement et l'activité cérébrale. Pris dans leur ensemble, les résultats de ces études suggèrent que plus la saillance d'un stimulus est importante, plus ce dernier capture l'attention, ce qui, par extension, peut permettre de faciliter la détection dudit stimulus si ce dernier est une cible (Huang & Elhilali, 2017).

La saillance est une caractéristique intrinsèque des stimuli enclenchant le déploiement de traitement attentionnels involontaires visant à faciliter la détection de ce stimulus. Cette propriété peut s'avérer particulièrement utile car elle permet de faciliter la détection des stimuli pertinents. En revanche, lorsque les éléments non pertinents de l'environnement sont saillants, cette facilitation doit être inhibée : un stimulus saillant et non pertinent est un élément distracteur qui détourne l'attention au détriment de la réalisation de la tâche en cours. Si le distracteur engendre une capture attentionnelle involontaire, il sera donc nécessaire de volontairement ré-orienter l'attention vers les stimuli pertinents pour la réalisation de la tâche. Cet état de fait s'avère problématique dans le domaine de la recherche en neurosciences cognitives : comment dissocier mesures de l'attention volontaire et involontaire lors de l'occurrence de stimuli distracteurs si ces deux formes attentionnelles agissent de concert ? En effet, lors de tâches actives les réponses - comportementales ou cérébrales - aux cibles précédées de distracteurs reflètent l'action simultanée de l'attention involontaire détournant le focus vers le distracteur, et de l'attention volontaire qui, par la suite, ré-orienté le focus vers la cible à détecter. Mesurer l'attention involontaire de manière exclusive et objective constitue donc un défi majeur dans le domaine des neurosciences.

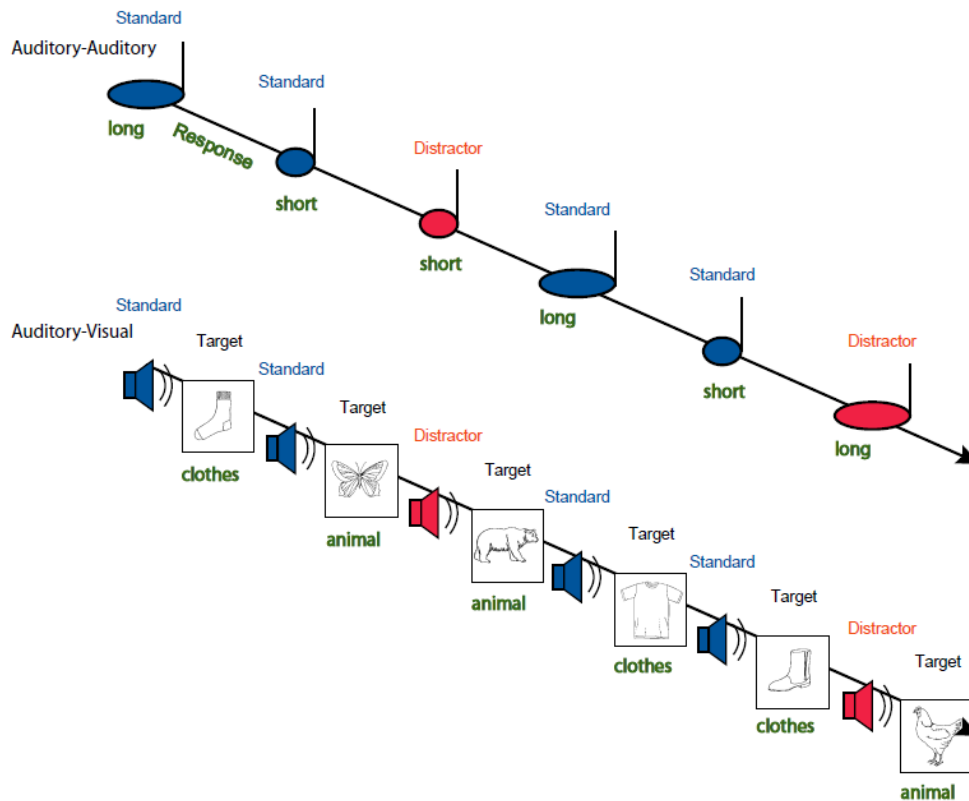
## *ii. Déviance*

Si les caractéristiques inhérentes des stimuli non pertinents peuvent déclencher la capture involontaire de l'attention, certaines de leurs caractéristiques extrinsèques peuvent également contribuer à ce phénomène. Sur la base de la régularité d'apparition des stimuli, le cerveau établirait et stockerait des modèles prédictifs des entrées sensorielles en provenance de l'environnement. Si un stimulus n'est pas compris dans le modèle prédictif, alors ce stimulus sera catégorisé comme déviant ou nouveau (Escera et

al., 1998; Escera, Yago, et al., 2000; Näätänen et al., 1978). Ce mécanisme permet de détecter les violations de prédiction relatives à l'environnement. La majorité des travaux portant sur la détection de déviance (aussi dite de changement ou de nouveauté) ont été réalisés dans la modalité auditive (Escera et al., 1998; Escera, Yago, et al., 2000; Näätänen et al., 1978, 2007; Näätänen, 1972; Stefanics et al., 2014; Wetzel & Schröger, 2014).

Depuis les années 1970, la capture involontaire de l'attention par des stimuli déviants se trouvant hors du focus attentionnel a été extensivement étudié par le biais de tâches dites Oddball. Durant ce type de tâche, un son standard est présenté séquentiellement, tandis que des sons moins fréquents, déviants (e.g. un son à 600 Hz diffusé dans une séquence de sons standard de 400 Hz) ou nouveau (aussi dit 'novel', dans ce cas le déviant est un son environnemental, e.g. le bruit d'un insecte), sont rarement présentés à la place du son standard. Ces sons déviants ou nouveaux sont les distracteurs des paradigmes Oddball. Dans la version passive de cette tâche, il est demandé au participant de ne pas prêter attention aux sons déviants ou nouveaux, ou bien d'essayer simplement d'ignorer tous les sons présentés. Ce type de paradigme passif s'avère idéal lorsqu'il s'agit d'étudier le traitement cérébral des sons saillants ; il ne permet cependant pas de mesurer l'impact d'une distraction auditive sur les performances comportementales. Pour pallier ce manque, une version active de ce paradigme fût proposée en 1998 par Schröger et ses collaborateurs. Communément, il est possible de distinguer deux déclinaisons de ce paradigme : (i) la première est dite Oddball actif auditif et demande au participant de discriminer des sons standards courts ou long, en ignorant des déviations sur une autre dimension acoustique (par exemple la fréquence) présentées rarement; (ii) la seconde, dite Oddball actif visuo-auditif, demande au participant de discriminer des images selon leur catégorie d'appartenance, ceci en essayant de ne pas prêter attention aux sons standards, déviants ou nouveaux systématiquement diffusé avant l'apparition d'une image (Fig. 8).

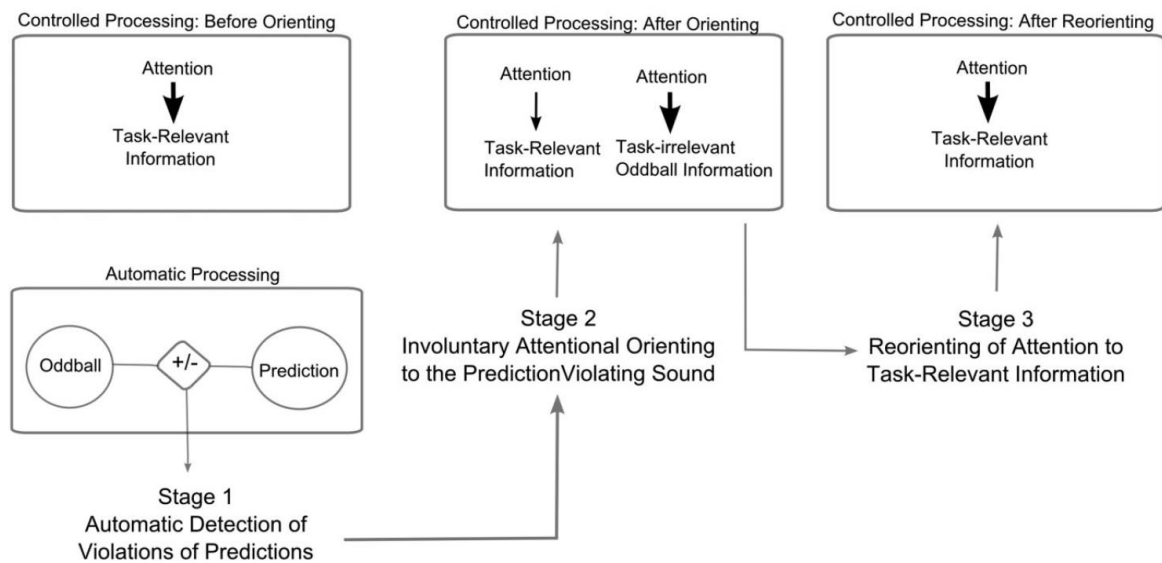




**Figure 8** : Illustration du déroulement des essais dans des paradigmes Oddball actifs dans la modalité auditive uniquement, ou auditive et visuelle (Wetzel & Schröger, 2014).

Le modèle de Wetzel et Schröger (2014), inspiré des modèles précédemment élaborés par ce dernier auteur (Berti, 2008; Horváth, Winkler, et al., 2008b; Schröger & Wolff, 1998), décrit trois étapes d'action des processus attentionnels lors de la détection de déviance. De manière similaire aux théories s'intéressant à l'attention involontaire dans la modalité visuelle, ce modèle considère que la représentation d'un son serait stockée temporairement dans le cerveau sous la forme d'une image auditive, ce qui permettrait l'extraction de ses caractéristiques spécifiques comme son intensité. Ce modèle stipule que l'attention involontaire agirait de manière concomitante à l'attention volontaire. Durant la réalisation de la tâche, et selon la première étape de ce modèle, l'attention involontaire traiterait les éléments de l'environnement avoisinant en arrière-fond, de sorte à permettre le rafraichissement du modèle de prédiction acoustique. A cette phase, l'attention involontaire permet également de vérifier que les sons présentement entendus s'alignent avec les prédictions théoriques du modèle. En ce sens, la survenue d'un son déviant est considérée comme une violation des prédictions établies par le modèle : cette déviance capture alors l'attention. Au second stade du modèle de Wetzel et Schröger, l'attention est maintenant dirigée vers le son déviant et, du fait de la capacité de traitement limitée de

l'attention, moins de ressources sont allouées au traitement contrôlé des stimuli pertinents pour la réalisation de la tâche en cours : la capture involontaire de l'attention entraverait donc les performances comportementales. Enfin, et selon la troisième étape de ce modèle, l'attention est volontairement ré-orientée vers l'information pertinente, et les ressources sont ainsi rendues pleinement disponibles pour la réalisation la tâche. Les trois étapes du modèle de Wetzel et Schröger sont respectivement associées à trois réponses cérébrales qui suivent l'apparition d'un distracteur.



**Figure 9 :** Modèle de la distractibilité selon Wetzel & Schröger (2014). Etape 1 (stage 2) détection automatique des violations de prédictions ; étape 2 (stage 2) orientation attentionnelle involontaire vers le son ayant violé les prédictions ; étape 3 (stage 3) réorientation de l'attention vers les informations pertinentes pour la tâche en cours (Wetzel & Schröger, 2014).

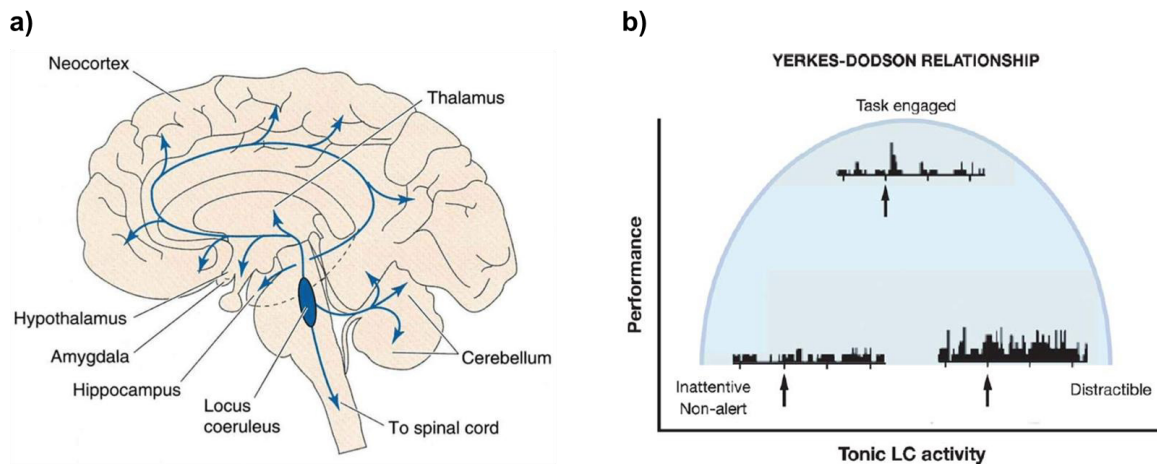
Selon ce modèle électrophysiologique, l'orientation involontaire de l'attention vers un stimulus non pertinent engendre un effet délétère sur les performances comportementales, car, lorsque ce phénomène se produit, moins de ressources sont disponibles pour réaliser le traitement des stimuli pertinents. Plusieurs études utilisant des paradigmes de type Oddball actifs ont rapporté une augmentation des TR aux sons ou images cibles lorsque ces derniers sont précédés de sons déviants ou nouveaux. Cependant, la capacité des tâches de type Oddball à mesurer la distractibilité est actuellement remise en question. Si certaines études rapportent une augmentation des TR aux cibles précédées de sons déviants comparés à des sons standards, cet effet s'estompe toutefois si le son précédant la cible est nouveau plutôt que déviant (Escera et al., 1998). Dans ce type de tâche, la durée de l'intervalle inter-stimuli est fixe : chaque son

déviant peut donc être rapidement interprété par le cerveau comme un stimulus avertisseur (aussi dit « warning signal ») véhiculant une information relative au moment de survenue de la cible. En cela les stimuli déviants utilisés pour engendrer un effet de distraction dans les tâches de type Oddball déclencheraient à la fois le déploiement de processus attentionnels involontaires (lié à la saillance et déviance du stimulus considéré comme distracteur) et volontaires (liés à la valeur informative de ce même distracteur) sans pour autant permettre de dissocier la contribution de chacun de ses processus dans l'effet de distraction comportemental (Masson & Bidet-Caulet, 2019; SanMiguel et al., 2008). Par ailleurs, certaines utilisant également des tâches de type Oddball suggèrent que - de manière quelque peu contre intuitive - la présence de sons distracteur pourrait également entraîner une facilitation du traitement du son ou de l'image cible.

## 1.4. L'état d'alerte

De nombreuses études tant chez l'animal (Aston-Jones & Cohen, 2005; Lecas, 2004; Reynaud et al., 2019) que chez l'humain (Epstein et al., 2011; Wass et al., 2019; Wass, 2017; Wass et al., 2015) ont montré que le niveau d'alerte module les performances attentionnelles selon la loi de Yerkes Dodson. Selon ce modèle, des performances attentionnelles optimales pourraient être observables à un niveau modéré d'alerte, tandis qu'un niveau trop faible ou trop important induirait des difficultés attentionnelles respectivement relatives à un hypo ou hyper fonctionnement. La robustesse expérimentale de cette théorie a rendu indissociable l'étude de l'attention et de l'état d'alerte (voir Fig. 10b).

Au niveau central, l'état d'alerte dépend principalement de l'activité d'un système impliquant le Locus Coeruleus (LC) et les réseaux noradrénergiques. Dans le cerveau, la noradrénaline (ou norépinéphrine) est un composé organique agissant comme un neurotransmetteur et augmentant l'excitabilité corticale au niveau des organes effecteurs. Elle est principalement libérée dans le tronc cérébral par les fibres nerveuses du système nerveux orthosympathique (ou sympathique). A l'origine principale de sa synthèse se trouve un noyau rostro-dorsal du tronc cérébral, le LC ; ses efférences se projettent dans la quasi-totalité du cerveau et du cervelet (voir Fig. 10a). L'état d'alerte dépend de deux types de mécanismes physiologiques : l'alerte tonique et phasique. Respectivement, ces mécanismes renvoient à (i) une activité basse fréquence du LC, plutôt stable dans le temps et responsable du niveau d'éveil général, et à (ii) une activité phasique entraînant des augmentations puissantes, mais transitoires, du niveau d'éveil. Chez l'animal, l'activité des neurones du LC provoquerait une facilitation des traitements sensoriels observable moins de 10 ms après la survenue d'une décharge phasique (Lecas, 2004).



**Figure 10** : Projections du Locus Coeruleus (LC) vers les différentes régions du système nerveux central et influence de l'activité de ses neurones sur l'état attentionnel (Aston-Jones & Cohen, 2005). La faible fréquence de décharge des neurones du LC est liée à un état inattentif, non alerte ; la fréquence modérée de décharge est liée à un état attentif ; la forte fréquence de décharge est liée à un état de distractibilité accrue.

Parallèlement aux modulations de l'activité encéphalique, les décharges noradrénergiques du LC influencent l'activité du système nerveux sympathique. D'un point de vue expérimental, les techniques privilégiées d'étude de l'état d'alerte sont notamment la dilatation pupillaire, l'électrocardiogramme et la conductance cutanée. Ces techniques physiologiques fournissent des mesures objectives de l'effet de l'alerte ; il est toutefois à noter qu'elles présentent une faible résolution temporelle, ce qui limite intrinsèquement l'étude des modulation rapides et subtiles induites par l'activité phasique. Du fait de la quasi ubiquité des efférences cérébrales du LC, l'alerte tonique et phasique ont été décrites comme ayant une influence aspécifique sur différentes composantes attentionnelles. Pris dans leur ensemble, les résultats des études réalisées chez l'humain rapportent qu'une diminution du niveau d'alerte tonique induirait des décrochages attentionnels caractérisés par une augmentation de la variabilité des TR lors de tâche de détection de cibles auditives. Par ailleurs, une augmentation importante de l'alerte tonique a également été associée à une diminution des TR et de leur variabilité, ainsi qu'à une augmentation des réponses anticipées à la cible et des réponses aux distracteurs (Aston-Jones & Cohen, 2005). Pris dans sa globalité, ce phénomène comportemental traduit une fluctuation des performances attentionnelles volontaires et involontaires au cours du temps ; en cela, l'alerte contribue de manière inhérente à la conceptualisation de l'attention soutenue. Les fluctuations de différents marqueurs cérébraux ont notamment permis de mettre en évidence l'influence du niveau d'alerte tonique au cours du temps sur l'activité du réseau par défaut (Chang et al., 2016; Fan et al., 2012; Nagai et al., 2004) ou de

structures pariétales et préfrontales associées à l'attention sélective volontaire (Sadaghiani et al., 2010; Tracy et al., 2000). D'autre part, l'effet bénéfique de l'orientation volontaire de l'attention sur les TR suite à un indiçage valide plutôt que neutre est associée à une augmentation du niveau alerte phasique (Epstein et al., 2011; Geva et al., 2013). En revanche, les études s'intéressant à l'effet de l'alerte phasique sur l'attention involontaire restent plus rares et les mécanismes sous tendant l'interaction entre ces deux composantes cognitives s'avèrent peu documentés. L'état actuel des connaissances indique néanmoins que la survenue de stimuli non pertinents, saillants ou inattendus, enclenche également une réponse phasique qui engendre un effet bénéfique sur les performances de détection de cibles (Masson & Bidet-Caulet, 2019; Näätänen, 1992; SanMiguel, Linden, et al., 2010; SanMiguel, Morgan, et al., 2010; Wetzel et al., 2012, 2013). En 2018, Masson et Bidet-Caulet ont ainsi montré que cet effet facilitateur est observable jusqu'à 1500 ms suivant l'apparition du distracteur, ce indépendamment de la modalité sensorielle concernée. Par ailleurs, dans cette même étude, les scores subjectifs (questionnaire) d'intensité de l'état d'alerte induit par les sons distracteurs et l'amplitude de la réponse EEG P3a précoce au distracteur ont été trouvés positivement corrélés ; ceci suggère que cette réponse EEG serait un marqueur cérébral pertinent pour l'étude de l'alerte phasique.

## 1.5. La distractibilité

Depuis les années 1970, l'attention a été étudiée extensivement dans le domaine des neurosciences cognitives. L'intrication des différents systèmes attentionnels constitue un véritable défi lorsqu'il s'agit de mesurer leur efficacité respective. Cette difficulté à dissocier les effets comportementaux et marqueurs cérébraux de l'attention freine la compréhension de son fonctionnement. L'attention est actuellement conceptualisée comme une fonction cérébrale qui, volontairement ou non, facilite le traitement de certaines informations tout en ignorant les autres. L'attention volontaire permet la sélection des informations pertinentes pour réaliser une tâche. L'attention peut également être capturée involontairement par un stimulus saillant, inattendu, et être détournée de la tâche en cours. Cette forme involontaire de l'attention permet de réagir à un événement important mais non pertinent pour la tâche réalisée (e.g. une alarme au feu). Dans une perspective écologique, un bon équilibre entre l'attention volontaire et involontaire est crucial pour réaliser efficacement une tâche en restant réactif à l'environnement, sans être distrait en permanence. Cet équilibre est à l'origine de la distractibilité.

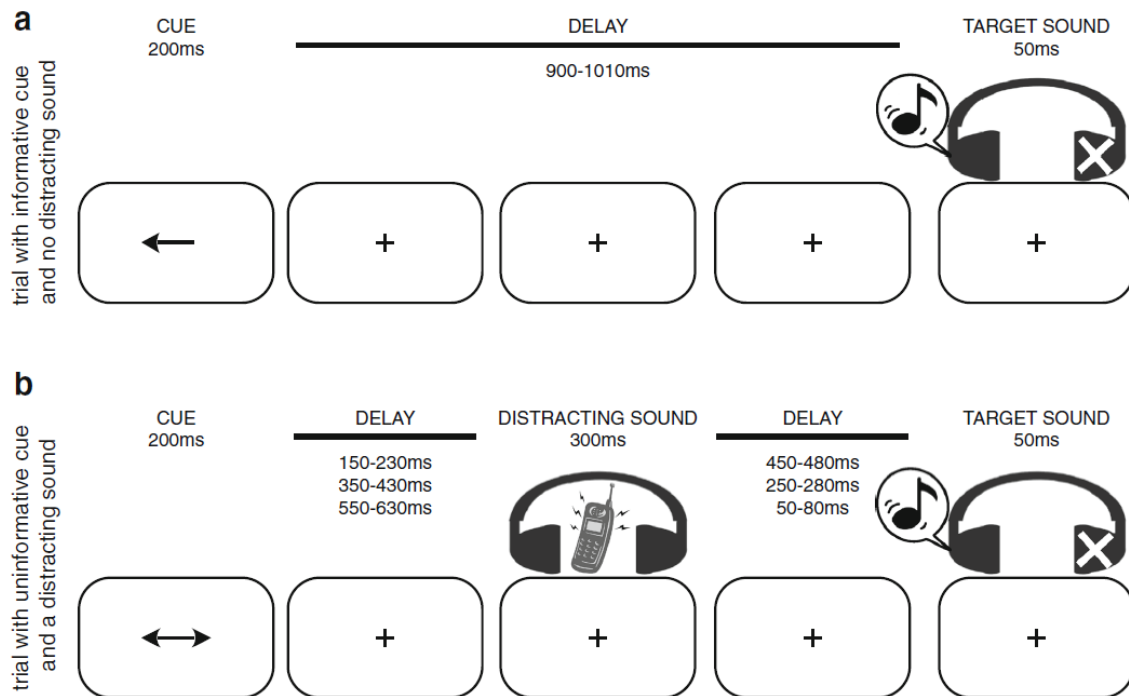
La définition de la distractibilité ne fait actuellement pas l'objet d'un consensus. Tout au long de ce manuscrit, la distractibilité sera considérée comme un état cognitif se manifestant par la tendance à prêter attention à des stimuli de l'environnement non pertinents au cours de la réalisation d'une tâche. En ce sens, la distractibilité n'est pas ici considérée comme un processus unitaire, mais comme la résultante de l'effet de différents modules attentionnels.

Dans le cerveau, l'émergence des fonctions attentionnelles volontaires dépend d'un réseau d'aires cérébrales dorsales et notamment du cortex intrapariétal et du cortex préfrontal supérieur (Corbetta et al., 2008; Corbetta & Shulman, 2002). Les mécanismes attentionnels involontaires reposent quant à eux sur un réseau cérébral ventral qui recrute des régions situées au niveau de la jonction temporo-pariétale et du cortex préfrontal inférieur principalement dans l'hémisphère droit (Corbetta et al., 2008; Corbetta & Shulman, 2002). Ce dernier réseau permet notamment l'orientation de l'attention sur la base d'indices exogènes (Posner, 1980, 2012) et s'active tout particulièrement lorsqu'un élément saillant ou inattendu survient dans l'environnement avoisinant (Elshafei et al., 2020). Par ailleurs, l'activité des structures du système dorsal peut moduler celle des structures ventrales, et inversement : ces deux circuits sont ainsi à la fois distincts et interdépendants (Elshafei et al., 2020; Weissman et al., 2006).

Par conséquent, la mesure dissociée de l'effet comportemental de l'attention volontaire et involontaire implique nécessairement la mise en place d'un design expérimental visant à induire à la fois l'orientation attentionnelle volontaire vers une cible pertinente, et une capture attentionnelle par des stimuli distracteurs non pertinents. Il est par ailleurs admis que l'alerte influence les performances attentionnelles volontaires et involontaires. Le rôle de l'activité phasique du LC en réponse à des stimuli pertinents a été documenté par le passé, et son effet comportemental a notamment été décrit par Posner et ses collaborateurs. En revanche, l'effet de l'alerte phasique sur les traitements attentionnels involontaires n'a pas été précisément caractérisé à ce jour, ce tant dans une dimension cérébrale que comportementale.

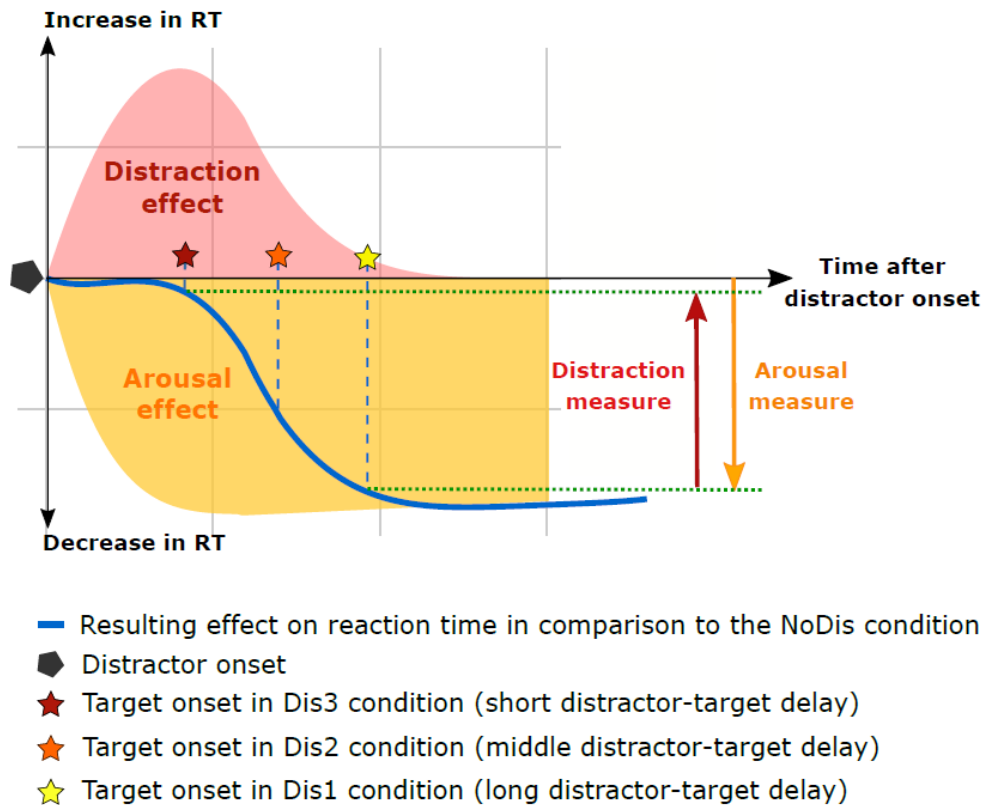
A ce jour, les tests neuropsychologiques existants ne permettent pas les mesures simultanées et dissociées de l'attention volontaire et involontaire, ainsi que de l'alerte phasique : ils ne permettent donc pas de caractériser précisément le niveau de distractibilité chez un individu. Cette difficulté à solliciter et mesurer, lors d'une même tâche, les différentes composantes attentionnelles empêche la caractérisation précise du niveau de distractibilité. Cette limite expérimentale entrave la compréhension du fonctionnement et des dysfonctionnements de la distractibilité. Le Competitive Attention test (CAT) est un test récemment élaboré pour combler le manque d'outils permettant de mesurer la distractibilité qui, tant dans une approche neurophysiologique que comportementale, permet de mesurer l'équilibre attentionnel (Bidet-Caulet et al., 2015). Inspiré des paradigmes de type Posner et Oddball, le CAT se base, dans sa version la plus classique, sur l'utilisation d'indices visuels informatifs et non-informatifs (i.e. valides et neutres), de sons distracteurs au délai de survenue variable et de cibles auditives monaurales. Dans les essais de la tâche ne comportant pas de distracteur (NoDis), un indice visuel apparaît tout d'abord à l'écran (flèche pointant à droite, à gauche ou dans les deux directions simultanément), puis une cible auditive est diffusée par le biais d'un casque dans l'oreille gauche ou droite du participant. Dans les essais comportant un distracteur, le principe est identique à l'exception du fait qu'un son distracteur binaural peut être joué à trois moments distincts : juste après la disparition de l'indice (Dis1), entre l'indice et la cible (Dis2) ou juste avant l'apparition de la cible (Dis3) (voir Fig. 11). Le participant, quant à lui, a pour instruction de détecter le plus rapidement possible les cibles auditives en pressant un bouton.





**Figure 11** : Illustration du déroulement des essais (a) sans distracteurs et (b) avec distracteurs dans la version originale du paradigme CAT. L'indice est présenté à l'écran, suivit d'un délai durant lequel est diffusé, ou non, un son distracteur binaural ; un son cible monaural à détecter est ensuite diffusé (Bidet-Caulet et al., 2015).

Dans les conditions sans distracteur, la présence des indices permet de mesurer l'orientation volontaire de l'attention sur une position spatiale au travers de marqueurs tels que les TR en condition informative et non informative. Dans les essais comportant des distracteurs, la forte saillance des sons capture l'attention, détournant ainsi l'attention de la position spatiale de la future cible. Par ailleurs, le CAT permet de dissocier les effets comportementaux de la capture attentionnelle involontaire et de l'alerte phasique. Tel que précédemment suggéré dans la littérature (Näätänen, 1992; SanMiguel, Linden, et al., 2010; SanMiguel, Morgan, et al., 2010; Wetzels & Schröger, 2014), et comme le confirme les résultats des différentes études s'appuyant sur le CAT (Bidet-Caulet et al., 2015; Elshafei et al., 2020; ElShafei, Bouet, et al., 2018), la présence d'un distracteur induirait deux phénomènes : une capture attentionnelle involontaire puissante mais transitoire, qui ralentit la détection de cible, et une augmentation de l'alerte phasique qui, a contrario, facilite son traitement. Au regard du déroulement temporel respectif de la capture attentionnelle et de l'alerte phasique, le contraste des TR en condition NoDis et Dis1 permet de mesurer l'effet facilitateur de l'alerte, tandis que le contraste des TR en condition Dis3 et Dis1 permet de mesurer l'effet délétère de la capture attentionnelle (Fig. 12).



**Figure 12** : Représentation schématique de la dynamique des effets des sons distracteurs dans le paradigme CAT. Surface rouge : effet de distraction ; surface jaune : effet de l'alerte phasique. La ligne bleue représente les TR modulés par l'effet conjoint de la distraction et de l'alerte phasique au cours du temps. Le pentagramme noir marque le début du son distracteur ; les étoiles indiquent le début du son cible en condition Dis3 (rouge), Dis2 (orange) et Dis1 (jaune). Les flèches rouge et jaune représentent respectivement les mesures comportementales de la distraction (Dis3-Dis1) et de l'alerte phasique (NoDis-Dis1) (Hoyer et al., 2019).

Le paradigme CAT s'avère d'autant plus intéressant qu'il propose d'évaluer la distractibilité dans la modalité auditive. Alors que la majorité des travaux sur l'attention sont réalisés dans le domaine visuel, les distractions auditives sont de nos jours les plus difficiles à éviter. S'il peut en effet s'avérer aisé de détourner le regard lorsque qu'un objet présent dans notre champ de vision nous distrait, il est en revanche plus difficile de ne pas prêter attention à l'environnement sonore avoisinant. La distractibilité auditive joue un rôle central dans l'interaction sociale (e.g. écouter son interlocuteur sans se laisser distraire) et l'acquisition des apprentissages (e.g. écouter attentivement la dictée en ignorant les bruits des camarades de classe). Malgré cette importance évidente de la distractibilité auditive, seul un petit nombre d'études a permis d'isoler des marqueurs comportementaux et EEG de la distractibilité ; par conséquent, elle reste aujourd'hui difficile à caractériser tant d'un point de vue fondamental que clinique. Ce point s'avère particulièrement critique dans le domaine de l'enfance : les difficultés attentionnelles, qu'elles soient considérées

comme pathologiques ou non, impactent durablement le développement de l'enfant en entravant ses capacités sociales et d'apprentissage.

## 1.6. Conclusion du chapitre

Les modèles les plus influents dans le domaine des neurosciences cognitives suggèrent que la sélection attentionnelle se produirait à la fois à un niveau précoce et tardif du traitement de l'information sensorielle. Pour sélectionner l'information la plus pertinente de l'environnement, l'attention facilite et inhibe respectivement le traitement des stimuli pertinents et non pertinents. La facilitation et l'inhibition permettent l'orientation attentionnelle ; le déclenchement des mécanismes facilitateurs et inhibiteurs est coordonné par le système exécutif mais dépend également du niveau d'alerte. Les systèmes attentionnels interagissent donc pour sélectionner les informations les plus pertinentes méritant d'être traitées à plus haut niveau. Cette sélection peut toutefois être biaisée par la survenue de stimuli distrayeurs qui capturent l'attention et détournent le focus attentionnel de sa cible principale. La distractibilité est un état attentionnel qui sous-tend la tendance à prêter attention à des stimuli non pertinents. Lors de la plupart des activités quotidiennes, nous réalisons des tâches simples et automatisées (e.g. marcher dans la rue) lors desquelles les fonctions exécutives sont peu invoquées. Lorsque la charge cognitive liée à la tâche à réaliser est faible, les systèmes d'orientation attentionnelle et d'alerte conditionnent ensemble l'état de distractibilité. L'orientation attentionnelle renvoie au concepts d'attention volontaire et involontaire, tandis que l'alerte fait référence aux variations d'intensité de l'attention au cours du temps ; ces deux composantes interagissent pour nous permettre de réaliser une tâche simple en restant alerte à l'environnement avoisinant, sans pour autant être distrait en permanence. Cependant, les études réalisées par le passé ont évalué les composantes impliquées dans la distractibilité de manière dissociée et ont rapporté des résultats contradictoires concernant la quantification de l'impact d'un stimulus distrayeur sur les performances comportementales chez l'adulte. Récemment, le paradigme CAT a permis les mesures simultanées des principales composantes attentionnelles impliquées dans la distractibilité. La mesure simultanée des fonctions attentionnelles qui sous-tendent l'état de distractibilité a permis de mettre en lumière les raisons de l'obtention de résultats contradictoires concernant la quantification de l'effet comportemental de la distraction. Si ce test a jusqu'ici permis de caractériser les aspects comportementaux relatifs à la distractibilité chez l'adulte, ces manifestations n'ont pas encore été étudiées chez l'enfant. L'utilisation de ce paradigme chez l'enfant pourrait toutefois permettre de dissocier les

trajectoires développementales conjointes des principales facettes attentionnelles de la distractibilité. L'apport de nouvelles connaissances fondamentales sur le sujet permettraient de mieux comprendre quels mécanismes peuvent efficacement être recrutés en fonction de l'âge pour déployer un état de concentration efficace tout en restant alerte à l'environnement avoisinant.

## Chapitre 2. Développement de la distractibilité

### 2.1. Approche neurocognitive du développement de l'enfant

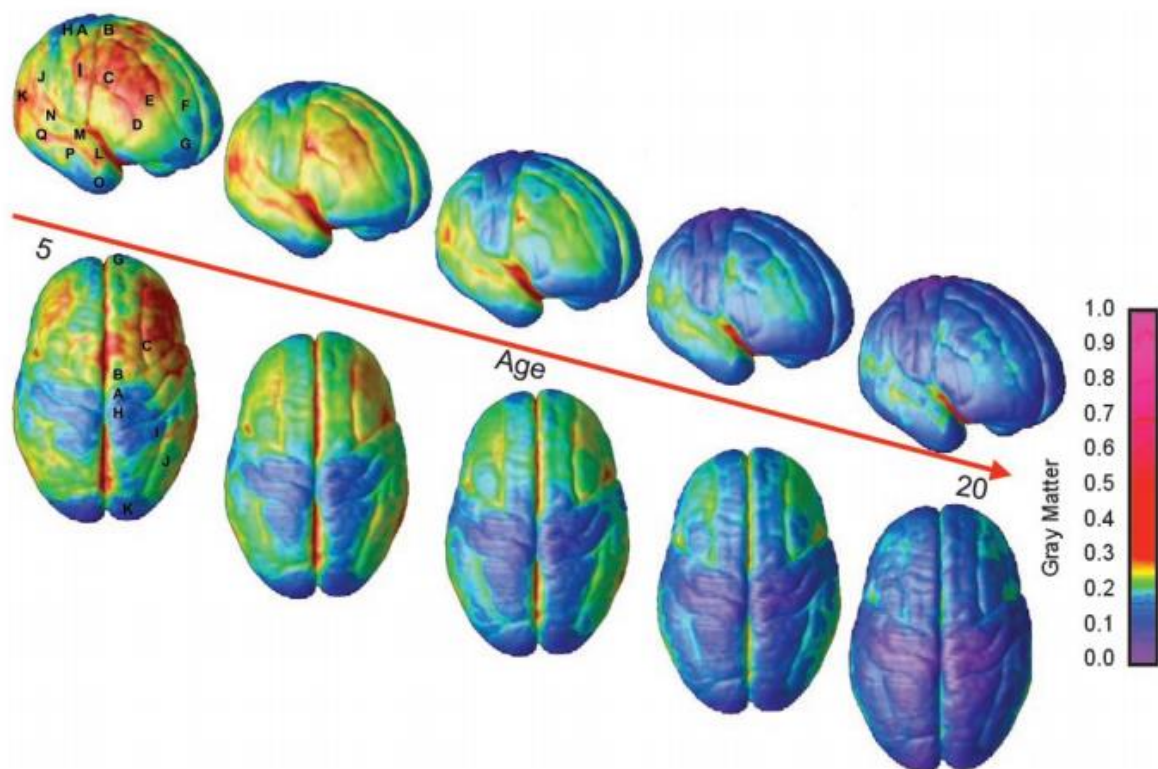
En 1762, Rousseau publie l'Emile ou De l'Education, un traité portant sur la méthode éducative. Cette publication aura pour effet l'émergence de nouveaux questionnements concernant le développement de l'enfant et de ses capacités d'apprentissages. Il faudra néanmoins qu'un siècle s'écoule pour que naissent les fondements de la psychologie du développement, avec notamment les premières observations comportementales d'enfants décrites par Taine et Darwin, respectivement en 1876 et 1877. Tant en psychologie qu'en neurosciences, et quelle que soit l'approche adoptée, les travaux dans le domaine du développement cherchent nécessairement à identifier et expliquer les continuités ou discontinuités développementales d'aspects particuliers de la cognition. La psychologie du développement est actuellement marquée par le courant neuro-constructiviste. Le neuro-constructivisme est une théorie récente du développement cognitif qui intègre perspective piagétienne (élaboration progressive de la complexité des représentations mentales au travers de processus liés à l'expérience au cours de la vie) aux données relatives au développement anatomique et fonctionnel du cerveau (Johnson, 2001; Karmiloff-Smith, 1998; Westermann et al., 2007). Cette théorie postule que le développement se fait en fonction de l'interaction de facteurs génétiques, cérébraux et environnementaux. Un de ses principes centraux est de concevoir la modularité cérébrale et cognitive comme dépendante de l'environnement interne et externe de l'individu ainsi que de son expérience générale. Le courant neuro-constructiviste prend ainsi en compte la dépendance contextuelle, mais fonde son approche sur l'adéquation entre théories du développement psychologique et cérébral (Thomas et al., 2014).

A la naissance, le cerveau du nouveau-né ne représente qu'un tiers du volume de celui de l'adulte. Durant l'enfance, guidée par la programmation génétique et au contact de l'environnement, le nombre de neurones, ainsi que leurs connexions dendritiques et synaptiques, va augmenter pour paradoxalement diminuer par la suite. Ce fait biologique induit des changements anatomiques notamment visualisables grâce à l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). L'évolution du volume et de la densité de matière grise est spécifique à la région cérébrale concernée mais alterne systématiquement entre des phases de prolifération et de régression ; le premier phénomène engendre la création de nouvelles connexions neuronales tandis que le second, également désigné par le terme d'élagage synaptique, permet la différenciation de réseaux neuronaux locaux (Blakemore

& Choudhury, 2006; Crone & Ridderinkhof, 2011; Gogtay, Giedd, Lusk, Hayashi, Greenstein, Vaituzis, Nugent, Herman, Clasen, Toga, Rapoport, et al., 2004). Les études longitudinales et transversales indiquent qu'au cours du développement normal, le volume de matière grise dans le cortex connaît une augmentation linéaire jusqu'à 6-7 ans (Crone & Ridderinkhof, 2011) ; s'ensuit des accroissements non linéaires survenant localement pour les lobes frontaux et pariétaux aux alentours de 12 ans, puis ce type de modification se retrouve sur les territoires temporaux vers les 16 ans (Blakemore & Choudhury, 2006; Gogtay, et al., 2004). Entre 4 et 8 ans la densité de matière grise subit une réduction dans les cortex pariétaux dorsaux et dans les régions des aires sensorimotrices primaires ; cette perte va par la suite progresser de manière latérale et caudale, des cortex temporaux antérieurs jusqu'aux cortex préfrontaux dorsolatéraux (Blakemore & Choudhury, 2006; Gogtay, et al., 2004; Toga et al., 2006). Entre 11 et 13 ans la réduction la plus prononcée se retrouve au sein des lobes pariétaux, supportant principalement l'orientation spatiale (Blakemore & Choudhury, 2006). Les régions préfrontales dans leur ensemble arrivent tardivement à maturité et le phénomène de diminution de la densité de matière grise se prolonge au sein de ces aires jusqu'aux alentours de 20 ans (Blakemore & Choudhury, 2006; Toga et al., 2006). Bien que les études portant sur la question soient plus rares, il est également possible de noter une diminution de la densité de substance grise de structures sous-corticales : de l'enfance à l'adolescence on observe une réduction spécifique dans les ganglions de la base ainsi qu'une augmentation du volume de l'hippocampe et de l'amygdale (Toga et al., 2006).

En parallèle au développement de la matière grise se produisent également des modifications anatomiques concernant la substance blanche. Parmi les cellules gliales, les oligodendrocytes dans le système nerveux central sont capables de synthétiser de grandes quantités de membrane qui s'enroulent autour des axones pour former une gaine de myéline. L'IRM par tenseurs de diffusion (DTI) peut être utilisée pour estimer la régularité de la substance blanche qui constitue une mesure indirecte de la myélinisation et de la connectivité anatomique (Crone & Ridderinkhof, 2011; Stevens et al., 2009). La myélinisation des fibres connectant les différentes régions cérébrales de manière intra et inter hémisphérique suit un développement linéaire de l'enfance à l'âge adulte (Blakemore & Choudhury, 2006; Crone & Ridderinkhof, 2011; Stevens et al., 2009; Toga et al., 2006) et induit, durant le développement normal, une augmentation progressive de la vitesse de conduction de l'influx nerveux. Si le développement de la matière grise permet la spécification de réseaux neuronaux locaux, l'augmentation de la myélinisation des fibres améliore la communication cortico-corticale et cortico-sous-corticale via des connexions

longues distances. Ce type de modification anatomique permet le travail coordonné d'un ensemble de régions cérébrales ne se trouvant pas nécessairement à proximité immédiate. A titre d'exemple, entre 7 et 30 ans la maturation de la substance blanche préfrontale engendre une meilleure connectivité frontostriatale (Blakemore & Choudhury, 2006; Booth et al., 2003). La visée d'un tel phénomène est l'intégration de processus cognitifs de bas niveaux distincts en fonctions plus complexes, visant à supporter des processus de traitement de l'information de haut niveau tel que l'attention (Crone & Ridderinkhof, 2011; Stevens et al., 2009).



**Figure 13** : Augmentation du volume de matière grise dans le cerveau de 5 à 20 ans (étude longitudinale de Gogtay et al., 2004). L'échelle de couleur indexe la densité de la matière grise ou 1 = faible volume et 0 = volume important).

Le développement de la substance grise et de la substance blanche dans le cerveau au cours de l'enfance est lié à l'amélioration des performances dans des tâches mettant en jeu les fonctions attentionnelles (Blakemore & Choudhury, 2006; Booth et al., 2003; Crone & Ridderinkhof, 2011; Durston et al., 2002). En ce sens, l'état de distractibilité serait susceptible de varier en fonction de l'âge. Par ailleurs, les études réalisées par le passé indiquent que les enfants possèderaient une sensibilité particulière aux stimuli distracteurs de l'environnement. Comparées à celles des adultes, les performances comportementales



des enfants seraient particulièrement impactées par la présence d'éléments distrayeurs alentour : ces résultats suggèrent donc que les changements anatomiques dans le cerveau sont associés à un phénomène de maturation attentionnelle.

Cependant, le développement des différentes facettes attentionnelles impliquées dans la distractibilité reste imprécis à ce jour. Pour mieux comprendre l'origine de la distractibilité chez l'enfant il convient, en effet, d'identifier les continuités et discontinuités développementales de fonctions distinctes, mais toutefois interdépendantes. Le premier indice du développement des composantes attentionnelles de la distractibilité transparait au travers du comportement de l'enfant qui, implicitement, reflète l'efficacité des fonctions cérébrales qui le sous-tende. En ce sens, l'attention volontaire et involontaire, l'attention soutenue, l'alerte et le contrôle moteur constituent autant de fonctions attentionnelles et cognitives dont les trajectoires développementales pourraient contribuer à expliciter l'origine de la distractibilité accrue chez l'enfant. L'étude des performances comportementales dans des tâches construites pour mesurer ces différentes composantes constitue donc une première étape vers une meilleure compréhension du développement de la distractibilité.

## 2.2. Développement des manifestations comportementales de la distractibilité de l'âge préscolaire à l'âge adulte

La distractibilité est un état attentionnel qui conditionne la performance de chaque infime comportement déployé au quotidien. Cet état attentionnel se caractérise par une dynamique de propositions et de choix. L'attention involontaire est responsable de la sélection de nouvelles cibles attentionnelles. L'attention volontaire, pour sa part, examine ces propositions et détermine si l'une de ces dernières doit être traitée de manière prioritaire ; ce choix se base notamment sur l'importance de la tâche en cours, mais aussi l'intérêt vital ou personnel que revêt l'élément distracteur. A ce jour, il n'existe pas d'étude ayant permis de précisément caractériser les manifestations comportementales de la distractibilité de l'enfance à l'âge adulte. Cette lacune est notamment sous-tendue par le manque de tests permettant d'évaluer simultanément les différentes facettes attentionnelles impliquées dans la distractibilité. Les études réalisées par le passé ont toutefois tenté de retracer la trajectoire développementale des composantes attentionnelles de la distractibilité de manière dissociée.

### *i. Orientation attentionnelle volontaire et anticipation*

D'un point de vue comportemental, et dès l'âge de 4 mois, les enfants prêtent attention plus longtemps à un haut-parleur qui diffuse leur prénom plutôt qu'un autre (Mandel, Jusczyk, & Pisoni, 1995). Cette observation suggère que l'enfant est capable d'orienter volontairement (i.e. selon son propre chef) son attention vers des stimuli pertinents de l'environnement dès son plus jeune âge. Mais cette capacité est-elle réellement comparable à celle de l'adulte ? Permet-elle aux enfants de maintenir brièvement l'attention sur des informations pertinentes pour se préparer à y répondre rapidement ?

Il existe très peu de travaux ayant étudié le lien entre le développement des performances comportementales et celui de l'orientation et de l'anticipation attentionnelle chez les enfants d'âge préscolaire. Ceci s'explique par la difficulté naturelle de l'enfant, à cet âge, à se focaliser sur une tâche longue, répétitive et ennuyeuse : trois adjectifs qui qualifient sans aucun doute la plupart des tâches actives utilisées en psychologie expérimentale. L'orientation de l'attention a donc principalement été étudiée par la mesure des mouvements oculaires des enfants durant des paradigmes de fixation et d'amorçage. Posner et ses collaborateurs ont grandement contribué à documenter ce champ de recherche. Pris dans leur ensemble, les résultats des études portant sur le développement

de l'orientation attentionnelle durant la petite enfance indiquent que ce système serait fonctionnel dès les premiers mois (Colombo, 2001; Johnson et al., 1991; Ross-Sheehy et al., 2015) et superviserait majoritairement le contrôle attentionnel jusqu'à 3 ans ; entre 3 et 4 ans, une transition s'opérerait et le contrôle exécutif deviendrait alors le système d'influence principal de l'orientation attentionnelle (Posner et al., 2014). Chez l'enfant d'âge scolaire, le développement de l'orientation attentionnelle et l'anticipation ont notamment été étudiées à l'aide de versions adaptées à l'enfant du Attentional Network Test (ANT) (Berger et al., 2000). Le test ANT a initialement été développé par Posner et ses collaborateurs pour évaluer, de manière dissociée, l'efficacité comportementale de l'orientation attentionnelle, de la vigilance et du contrôle exécutif. Dans la version enfant classique de ce paradigme le participant réalise une tâche de discrimination. Dans 25% des essais, aucun indice n'est présenté à l'écran, tandis que dans les 75% des essais restants, un indice représenté par un astérisque noir apparaît à l'écran ; cet indice peut être central (un astérisque remplace la croix de fixation centrale), neutre (un astérisque au-dessus et en dessous de la croix de fixation centrale), valide ou invalide (un astérisque en haut ou en bas de la croix) et informe quant à la position spatiale de la prochaine cible. La cible se trouve systématiquement au centre d'une série de cinq poissons au sein desquels se trouve une flèche pointant vers la droite ou vers la gauche ; par ailleurs, le sens de la flèche du poisson cible peut être congruent ou non congruent avec celui des quatre autres poissons. L'objectif pour l'enfant est de nourrir le poisson central en pressant le plus rapidement possible la touche correspondante au sens de la flèche qu'il contient. Ce test propose de mesurer l'efficacité de l'engagement attentionnel en contrastant les TR en condition d'amorçage central et valide. Pour cette tâche, les performances des enfants de 6 à 10 ans sont similaires à celles des adultes ; ces résultats suggèrent que le système d'orientation attentionnelle serait fonctionnel dès le plus jeune âge (Rueda et al., 2004). D'autres études utilisant des paradigmes d'amorçage suggèrent néanmoins que l'effet facilitateur lié à l'orientation attentionnelle s'amplifierait entre 6 ans et l'âge adulte (Mezzacappa, 2004a; Reis Lellis et al., 2013). Actuellement, la littérature existante fait donc part de résultats contradictoires : la trajectoire développementale de l'orientation attentionnelle volontaire reste donc imprécise à ce jour.

## *ii. Attention soutenue*

Lorsque l'attention est orientée vers un objet pertinent, l'attention soutenue permet de maintenir un état de focalisation attentionnelle efficace sur cet objet. (Betts et al., 2006;

Graziano et al., 2011; Oken et al., 2006; Parasuraman et al., 1989; Riccio et al., 1994). Cette forme attentionnelle renvoie aux variations d'intensité de l'attention sur le long terme. L'attention soutenue est intrinsèquement liée au concept de vigilance, et serait plus particulièrement liée à la forme tonique de l'alerte (Levy, 1980).

Chez l'enfant d'âge préscolaire et scolaire, l'attention soutenue a été étudiée à l'aide de paradigmes de fixation visuelle (Brandes-Aitken et al., 2019) et de tâche de détection de cible (e.g. Continuous Performance Test, Conners, 2001; Mahone et al., 2001). Durant les tâches de fixation visuelle, l'attention soutenue a notamment été mesurée grâce au temps de fixation de stimuli cibles (Graziano et al., 2011; Ruff & Capozzoli, 2003) ou par la mesure de la fréquence de battement cardiaque (Reynolds & Romano, 2016; Richards & Casey, 1991). Les mesures fournies par les tâches actives de détection de cible s'appuient pour leur part sur des indices comportementaux tels que le nombre de réponses correctes, anticipées et manquées, ou la variabilité des TR au cours du temps. Pris dans leur ensemble, les résultats de ces travaux suggèrent un développement progressif de l'attention soutenue de la première année de la vie à l'adolescence (Brandes-Aitken et al., 2019; Kanaka et al., 2008; Reynolds & Romano, 2016; Thillay et al., 2015). L'attention soutenue s'améliorerait de 3 à 5 ans notamment grâce au développement de la capacité de l'enfant à mobiliser ses ressources attentionnelles (Reynolds & Romano, 2016; Richards & Casey, 1991) et à maintenir une sélectivité attentionnelle efficace au court du temps (Graziano et al., 2011; Ruff & Capozzoli, 2003). Ces changements développementaux se traduisent par une réduction progressive du nombre de réponses anticipées et manquées à la cible, ainsi qu'à une réduction de la variabilité des TR de l'âge préscolaire à l'âge adulte, avec des paliers de développement particulièrement marqués à 6 et 13 ans (Betts et al., 2006; Kanaka et al., 2008; Lin et al., 1999; Mahone et al., 2001; Thillay et al., 2015). Si les travaux réalisés par le passé ont pu mettre en évidence les périodes critiques de développement de l'efficacité de l'attention soutenue dans un contexte où il est nécessaire, ou non, d'inhiber un flux continu d'éléments distracteurs, peu ont étudié l'impact d'éléments distracteurs isolés sur le maintien du focus attentionnel au cours du temps. Le développement des composantes attentionnelles volontaire pourrait en effet permettre à l'enfant de mieux se protéger contre l'effet comportemental délétère de la distraction (Oakes & Tellinghuisen, 1994) : identifier la trajectoire développementale précise de l'attention soutenue dans un contexte écologique présentant des stimuli distracteurs pourrait permettre de mieux comprendre l'origine de la distractibilité accrue observée durant l'enfance.

### *iii. L'effet de distraction*

Avec la maturation du cortex préfrontal, les enfants acquièrent progressivement la capacité à contrôler leur comportement (Joaquín M. Fuster, 2002). Il n'est donc pas surprenant de constater que certaines études ont rapporté que la capacité à ignorer les éléments distrayeurs de l'environnement s'améliore de l'enfance à l'âge adulte (Halperin et al., 1994; Lane & Pearson, 1982; Ridderinkhof & van der Stelt, 2000). Toutefois, les études ayant tenté de caractériser l'impact des éléments distrayeurs sur les performances comportementales durant l'enfance sont assez rares.

Les sons saillants et inattendus survenant dans l'environnement alentour induisent un effet de distraction (i.e. l'allocation réactive des ressources au traitement du distracteur, suivi – lorsque cela est possible – par la réallocation des ressources au traitement des stimuli pertinents liés à la tâche), se traduisant par un coût comportemental (Bidet-Caulet et al., 2015; Escera, Alho, et al., 2000; Näätänen, 1992). Chez l'enfant, l'effet de distraction a principalement été étudié à l'aide de paradigme Oddball impliquant la discrimination de cible précédées par des sons standard ou déviants (Escera, Alho, et al., 2000; Wetzel et al., 2012; Wetzel & Schröger, 2007, 2014). Lors de ces tâches, des TR plus lents ainsi qu'un nombre d'erreurs plus important aux cibles précédées de sons déviants ou nouveaux sont considérés comme des marqueurs de l'effet de distraction. A notre connaissance, une seule étude a exploré le développement de l'effet de distraction sur les performances comportementales d'enfants d'âge préscolaire en utilisant une tâche Oddball : les résultats de cette étude indiquent que l'effet délétère de la distraction diminuerait drastiquement entre 4 et 5 ans (Wetzel et al., 2018). Concernant le développement de l'effet de distraction de l'âge scolaire à l'âge adulte, les résultats sont contradictoires : certaines études rapportent que l'effet de distraction diminuerait de l'enfance à l'âge adulte, et serait similaire chez l'adulte et chez l'enfant à partir de 10 ans (Wetzel et al., 2006; Wetzel, Schröger, et al., 2016; Wetzel et al., 2018; Wetzel & Schröger, 2007), tandis que d'autres travaux avancent que l'impact de la distraction serait - quel que soit l'âge - similaire chez l'enfant et chez l'adulte (Horváth et al., 2009; Leiva et al., 2016; Ruhnau et al., 2013; Wetzel et al., 2009).

Bien qu'il soit aisé, au quotidien, de noter que les enfants plus jeunes semblent plus distraits que les adultes, les résultats des études comportementales menées par le passé n'étaient pas nécessairement cette observation écologique. La distractibilité accrue observable chez l'enfant pourrait ainsi résulter d'un déséquilibre attentionnel lié à une difficulté naturelle à orienter et maintenir l'attention sur des éléments de l'environnement

pertinents. Les travaux de recherche réalisés jusqu'à présent ne permettent cependant pas d'affirmer avec certitude qu'une sensibilité particulière de l'attention involontaire au cours de l'enfance pourrait également contribuer à ce déséquilibre attentionnel. La disparité existante entre les conclusions des études portant sur le développement de l'effet de distraction pourrait s'expliquer par le fait que les tâches Oddball, principalement utilisées lorsqu'il s'agit d'étudier le développement de l'attention involontaire, ont été conçues pour caractériser l'effet délétère de la distraction sur les performance comportementales, mais leur design n'intègre cependant pas les caractéristiques des tâches permettant de mesurer l'effet facilitateur lié à l'enclenchement du système d'alerte lors de la perception de sons distracteur. Ainsi, l'alerte, notamment dans sa dimension phasique, pourrait contribuer à altérer la précision des mesures de la distraction fournie par les tâches de type Oddball. Si les trajectoires développementales de l'attention involontaire et de l'alerte phasique sont en effet dissociées, leur asynchronisme développemental pourrait contribuer à expliquer la disparité des conclusions des études ayant tentées de caractériser l'effet de distraction de l'enfance à l'âge adulte.

#### *iv. Alerte phasique*

Caractériser l'effet de distraction au cours du développement implique nécessairement la prise en compte de l'effet de l'alerte phasique engendré par la survenue d'éléments saillants, inattendus et non pertinents dans l'environnement.

A notre connaissance aucune étude portant sur le développement préscolaire de l'effet d'alerte phasique induit par un distracteur n'a été réalisée à ce jour. Chez l'humain, la quantification de l'alerte phasique est principalement réalisée par le biais de mesures électrodermales, issues de l'électrocardiographie ou encore de données en dilatation pupillaire. Chez l'enfant ces mesures sont le plus souvent recueillies durant des tâches passives. Une augmentation de l'activité électrodermale en réponse à une stimulation auditive a été observée durant la première année de la vie, suggérant que l'effet d'alerte phasique commencerait à se développer de manière très précoce (Hernes et al., 2002). De la même manière, la fréquence cardiaque des enfants de 6 à 12 mois augmente significativement dans un contexte où de nombreuses distractions sont présentes (Lansink & Richards, 1997), et une augmentation du diamètre pupillaire en réponse à des sons non pertinents a également été observée chez le jeune enfant comparé à l'adulte (Wetzel et al., 2015).

D'un point de vue comportemental, le développement de l'effet de l'alerte phasique a toutefois été étudié en relation avec celui de l'attention volontaire, notamment via l'utilisation de tâches d'amorçage de type Posner. L'effet facilitateur de l'alerte sur les processus de préparation motrice peut en effet être mesurée en contrastant la rapidité et la justesse des réponses dans des essais comportant, ou non, un indice (aussi dit « warning signal ») précédant l'arrivée de la cible. Certaines études rapportent ainsi que l'effet d'alerte phasique lié à l'occurrence d'un stimulus pertinent pourrait être mature à partir de l'âge de 4 mois (Colombo, 2001) et serait toujours stable durant l'enfance, notamment entre 6 et 10 ans (Rueda et al., 2004). Toutefois d'autres travaux suggèrent que l'effet facilitateur de l'alerte phasique augmenterait de 5 à 7 ans (Mezzacappa, 2004), ou encore que cet effet serait fonctionnel à partir de 5 ans mais s'améliorerait qualitativement de l'enfance à l'âge adulte (Berger et al., 2000).

Pris dans leur ensemble, les résultats des études menées par le passé suggèrent que l'effet d'alerte phasique engendré par la survenue d'un stimulus pertinent serait observable dès le plus jeune âge mais pourrait toutefois connaître un développement qualitatif de l'enfance à l'âge adulte. Si le développement de l'effet de l'alerte phasique a été exploré en lien avec celui de composantes attentionnelles volontaires, aucune étude – à notre connaissance – n'a tenté de caractériser le développement de l'effet d'alerte phasique engendré par la survenue d'un stimulus saillant et non pertinent, lié au déploiement de processus attentionnels involontaires. A ce jour, le développement de l'alerte phasique et son effet facilitateur sur les performances attentionnelles et motrices restent donc partiellement incompris. Par ailleurs, plusieurs études suggèrent qu'une augmentation de l'alerte phasique peut entraîner une augmentation de la propension à émettre une réponse motrice de manière anticipée (Aston-Jones & Cohen, 2005; M. J. Duncan et al., 2016).

#### *v. Impulsivité et contrôle moteur*

La génération et le contrôle des réponses motrices ne s'appuie pas uniquement sur les capacités musculaires et biomécaniques : la perception et la cognition sont en effet requises lorsqu'il s'agit de planifier et guider les actions (Keen, 2011). L'impulsivité est la tendance à agir alors que les circonstances contextuelles ou environnementales exigent pourtant une retenue motrice (Barratt & Patton, 1983; Stanford et al., 2009). En classe, l'enfant levant la main avant même d'avoir entendu la fin d'une question posée par l'enseignant se montre impulsif. De nombreux modèles ont par ailleurs suggérés

l'existence d'une relation entre niveau d'alerte, impulsivité et contrôle moteur (e.g., Barratt & Patton, 1983; Eysenck & Eysenck, 1985). L'expression de réponses impulsives pourrait être lié à un effet d'alerte phasique trop important (Eysenck & Eysenck, 1985; Houston & Stanford, 2001; Zhang et al., 2015) couplé, ou non, à des difficultés de contrôle moteur (Booth et al., 2003; Kanaka et al., 2008; van den Wildenberg & Crone, 2005; Wright et al., 2003).

Dans le domaine des neurosciences cognitives, le contrôle comportemental peut être conceptualisé selon deux dimensions : l'une est proactive, l'autre réactive. Le contrôle proactif renvoie à la capacité à maintenir une information en mémoire de travail et à se préparer à agir selon cette information et au regard des buts actuels, alors que le contrôle réactif renvoie à un mode de comportement déterminé avant tout par la réaction directe aux éléments se présentant dans l'environnement, ce quel que soit la pertinence des dits éléments (Blackwell & Munakata, 2014; Mäki-Marttunen et al., 2019; Munakata et al., 2012). En ce sens, les comportements impulsifs s'exprimant en l'absence de distracteur pourraient refléter une difficulté de maintien de contrôle proactif (Doebel et al., 2017; Gaspar & McDonald, 2014; Marini et al., 2016; Sawaki et al., 2012; Serences et al., 2004), tandis que l'impulsivité survenant en réaction à un stimulus distracteur précédant une cible pourrait traduire une difficulté de contrôle réactif (Gaspar & McDonald, 2014; Geng & DiQuattro, 2010).

Le développement cérébral suit un gradient postéro antérieur de maturation structurelle et fonctionnelle (Gogtay, et al., 2004; Toga et al., 2006). Cette dynamique développementale a été associée à une transition comportementale marquant le passage, de l'enfance à l'âge adulte, d'une stratégie à dominance réactive à une stratégie de contrôle proactif (Andrews-Hanna et al., 2011a; Chevalier et al., 2014; Doebel et al., 2017; Lucenet & Blaye, 2014; Munakata et al., 2012). Si le développement de l'arousal a été peu documenté par le passé, l'impulsivité et la capacité de contrôle moteur connaîtraient, respectivement, une diminution et une augmentation de l'enfance à l'âge adulte (Booth et al., 2003; Kanaka et al., 2008; Ridderinkhof et al., 1999; van den Wildenberg & Crone, 2005; Wright et al., 2003). Cependant, la littérature scientifique existante ne recense pas d'études ayant cherché à étudier le développement conjoint des différentes facettes attentionnelles impliquées dans la distractibilité et celles de l'impulsivité et du contrôle moteur. L'intrication des réponses sensorielles, attentionnelles et motrices rend difficile leur dissociation comportementale. En ce sens, l'étude des corrélats cérébraux de la



distractibilité pourrait permettre de mieux comprendre quels types de processus cognitifs influencent spécifiquement la réponse comportementale aux stimuli distracteurs.

## 2.3. Développement des corrélats cérébraux de la distractibilité

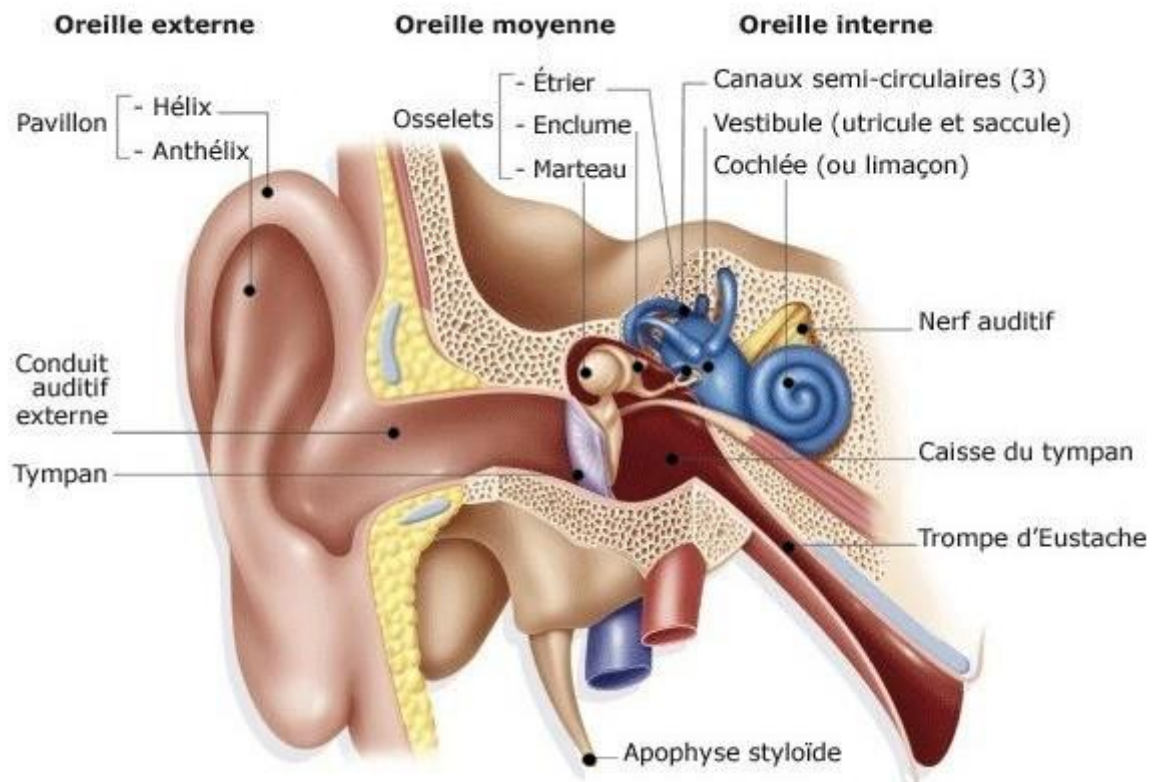
La neurophysiologie des réponses sensorielles auditives peut être étudiée grâce aux PE mesurés au niveau du scalp. Ces potentiels sont extraits de la moyenne des réponses EEG provenant de multiples essais expérimentaux. Cette méthode possède l'avantage de permettre la mesure directe du fonctionnement cérébral à une haute résolution temporelle et de manière totalement non invasive ; elle permet de plus d'enregistrer l'activité cérébrale au cours de tâches passives, ne requérant pas la participation active du sujet. En ce sens, la neurophysiologie s'avère particulièrement appropriée pour l'étude du développement cérébral, lorsque le jeune enfant peut difficilement réaliser une tâche active sur une longue durée.

### *i. Réponses cérébrales auditives chez l'adulte*

Les sons sont des ondes mécaniques, acoustiques, engendrées par des variations de pression du milieu naturel, qui peuvent être caractérisées par leur célérité, leur fréquence et leur intensité. L'origine des sons est imputable à l'excitation mécanique d'un matériau solide ayant un certain degré de souplesse. Cette excitation mécanique occasionne une alternance de compressions et de détentes des fluides de l'environnement (air ou liquide). Ces variations, autrement dites vibrations, sont induites par des changements de pression et de masse volumique des fluides constituant l'environnement ; spatialement, ces vibrations se propagent de proche en proche. La vitesse de propagation des ondes acoustiques varie selon la température du milieu ; en moyenne, la célérité des sons est de 340 mètres par seconde dans l'air. La fréquence et l'intensité des ondes acoustiques dépend des propriétés physiques des fluides au sein desquels elles se propagent : la propagation spatiale et longitudinale des sons peut être déterminée par la nature de l'excitation mécanique originelle et la composition physique du milieu au sein duquel cette dernière survient. Ainsi, plus la pression acoustique de l'environnement est importante, plus l'intensité (i.e. le volume) des stimuli sonores est élevée ; par ailleurs, l'impédance du milieu (i.e. sa résistance) contribue à la dissipation spatiale et temporelle des ondes acoustiques.

Chez l'humain, au niveau périphérique, les ondes acoustiques sont perçues par le biais de l'oreille interne et externe (Fig. 14). Les vibrations sonores sont captées par le pavillon auriculaire et pénètrent dans le conduit auditif externe. Ces ondes entraînent l'excitation mécanique du tympan dans l'oreille moyenne, puis celle des osselets (marteau, enclume

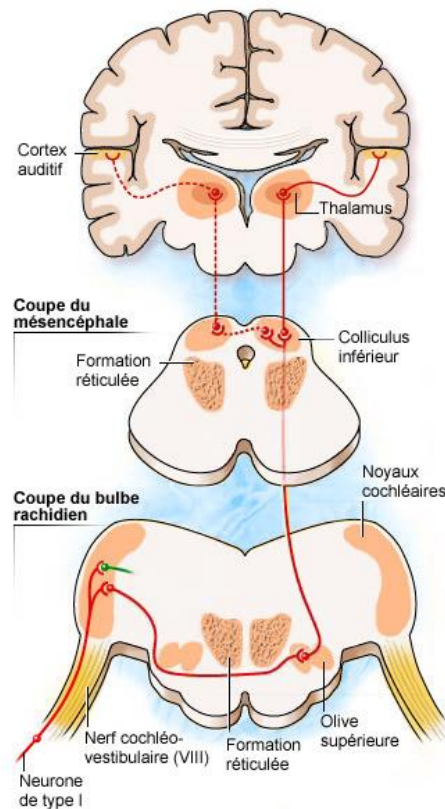
et étrier) permettant notamment la transformation des ondes acoustiques pour assurer leur transition d'un milieu aérien à un milieu liquide sans altération subséquente de leurs propriétés : l'oreille moyenne amplifie et adapte l'impédance. Dans l'oreille interne, les mouvements de l'étrier dans la fenêtre ovale engendrent des ondes hydrauliques ainsi qu'une vibration de la membrane basilaire de la cochlée. Une première analyse du son en fonction de sa hauteur est ici réalisée grâce à la tonotopie de la membrane basilaire. Les cellules ciliées de la cochlée permettent par ailleurs la transduction de l'énergie mécanique en énergie bioélectrique. Ce mécanisme revêt une importance cruciale car il permet de transformer le message sensitif en provenance des effecteurs périphériques, en message nerveux utilisable et interprétable par le système nerveux central.



**Figure 14** : Anatomie de l'oreille ("Description complète de l'oreille," n.d.).

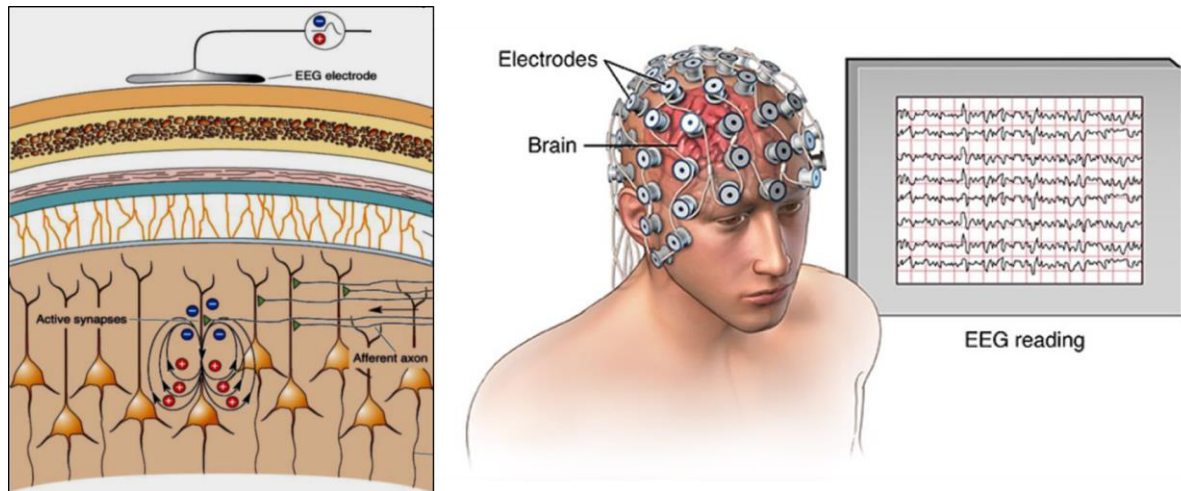
Le traitement cognitif d'un son implique que l'information auditive rejoigne les structures cérébrales dédiées à son traitement, notamment via la voie auditive primaire (voir Fig. 15). Au niveau central, les potentiels d'action relatifs à l'information auditive transitent notamment dans les noyaux cochléaire (analyse et codage des propriétés physiques du

son) et olivaire (contribue à la localisation spatiale du son) au niveau de la partie pontique du tronc cérébral. L'information auditive poursuit son cheminement via le complexe ventral et dorsal du noyau du lemnisque latéral (respectivement impliqués dans l'analyse de la durée du son et l'intégration des perceptions en provenance des deux oreilles), puis transite via un faisceau de fibres se projetant sur le colliculus inférieur, un noyau situé en position rostro-dorsal du mésencéphale. Le colliculus inférieur reçoit des messages ascendants en provenance du lemnisque latéral, ainsi que des messages descendants en provenance du cortex auditif. Ce noyau mésencéphalique est particulièrement impliqué dans la localisation spatiale de la source sonore et comprend un cortex externe et dorsal (analyse complexe de l'information auditive et identification de sons considérés comme nouveaux), ainsi qu'un noyau central (analyse de la fréquence, de l'intensité et de la longueur des ondes acoustiques). L'activité des structures du colliculus inférieur est soumise à un rétro contrôle en provenant du cortex auditif et du thalamus. Les fibres efférentes du colliculus inférieur projettent sur le corps genouillé médian du thalamus, composées d'une partie ventrale, médiale et dorsale. Ensemble, les structures du corps genouillé médian jouent un rôle relai crucial dans la transmission de l'information périphérique au niveau central, ceci notamment grâce aux propriétés intégratives (fréquence, intensité et durée) des neurones thalamiques. Pour finir, l'information est véhiculée jusqu'au cortex auditif au sein duquel l'information peut faire l'objet d'une analyse de plus haut niveau menant à sa reconnaissance, sa mémorisation ou encore son intégration en vue de l'émission d'une réponse motrice volontaire.



**Figure 15** : Représentation schématique du circuit de l'information au sein des voies auditives primaires (Audition - Oreille - Cochlée, n.d).

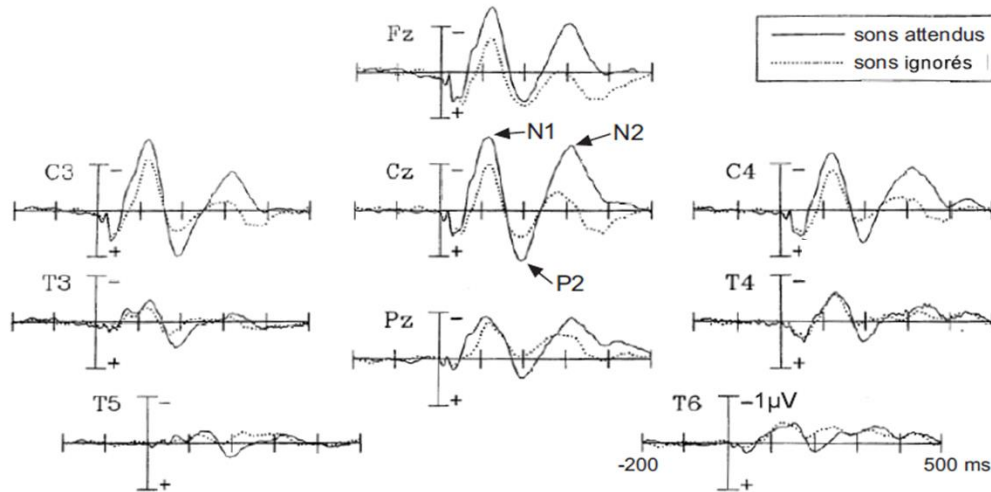
Le traitement des sons dans le cerveau est observable par le biais de l'EEG et des potentiels évoqués auditifs qui peuvent également être utilisés comme des marqueurs des modulations attentionnelles de la perception auditive. L'invention de l'EEG est généralement attribuée au scientifique et médecin britannique Richard Caton en 1875. En 1920, le neurologue allemand Hans Berger fut le premier à amplifier le signal électrique de l'activité neuronale et à décrire les tracés en forme de vague. L'EEG de surface est une technique d'imagerie cérébrale totalement non invasive qui, grâce à son excellente résolution temporelle, s'avère particulièrement adaptée lorsqu'il s'agit de caractériser l'effet de l'attention sur la perception auditive. Les examens EEG reposent sur la mesure de l'activité électrique du cerveau (voir Fig. 16). Celle-ci est effectuée par l'intermédiaire d'électrodes mises au contact du cuir chevelu par le biais d'un gel conducteur. En dépit de ses avantages, l'EEG présente néanmoins une faible résolution spatiale.



**Figure 16** : Représentation schématique du principe de l'électroencéphalographie. Les signaux enregistrés proviennent principalement de l'activité synchrone, dans le temps et dans l'espace, des neurones pyramidaux des couches corticales III, V et VI. Le signal amplifié et enregistré est visualisable pour chaque électrode (Neurosciences, 2020).

Dans ce cadre, un potentiel évoqué auditif (PEA) renvoie à la modification du potentiel électrique produite par l'activité de structures du tronc cérébral, du diencephale et du télencéphale en réponse à un stimulus sonore. Les mesures basées sur les réponses EEG permettant d'étudier les modulations attentionnelles du traitement des stimuli sensoriels sont notamment : l'amplitude maximum de pic en pic, la relation entre le maximum de l'amplitude et la fréquence dominante, la variabilité de l'amplitude et de la latence des pics. L'extraction des amplitudes des PEA, qui s'inscrivent dans un arrière-plan d'activité, nécessite de moyenner un nombre relativement important de réponses évoquées par un même stimulus pour permettre l'obtention d'un ratio signal sur bruit considéré comme satisfaisant (Edmonds et al., 2018). Les PEA sont généralement regroupés selon trois types de composante : les composantes de latence précoce (inférieure à 10ms), moyenne (entre 10 et 50ms) et tardive (supérieure à 50ms) ; l'amplitude maximum de ces réponses culmine au niveau du vertex. Les PEA de latence précoce sont liés au traitement de l'information auditive dans le tronc cérébral ; ces pics sont également appelés PEA du tronc cérébral, et s'avèrent particulièrement pertinents pour la détection clinique des pathologies de l'audition (e.g. détection du seuil de surdité ou de neuropathie auditives). Les PEA de latence moyenne reflètent pour leur part les traitements engendrés au niveau du corps genouillé latéral et du cortex auditif primaire : les effets de l'attention sur le traitement de l'information auditive seraient notamment visibles à cette latence. Chez l'adulte, la signature cérébrale des traitements attentionnels s'observe tout

particulièrement au travers des PEA de latence tardive, comme la P50, la N1 ou encore la N2 (voir Fig. 17) qui seront plus précisément décrites dans la suite de cette section.

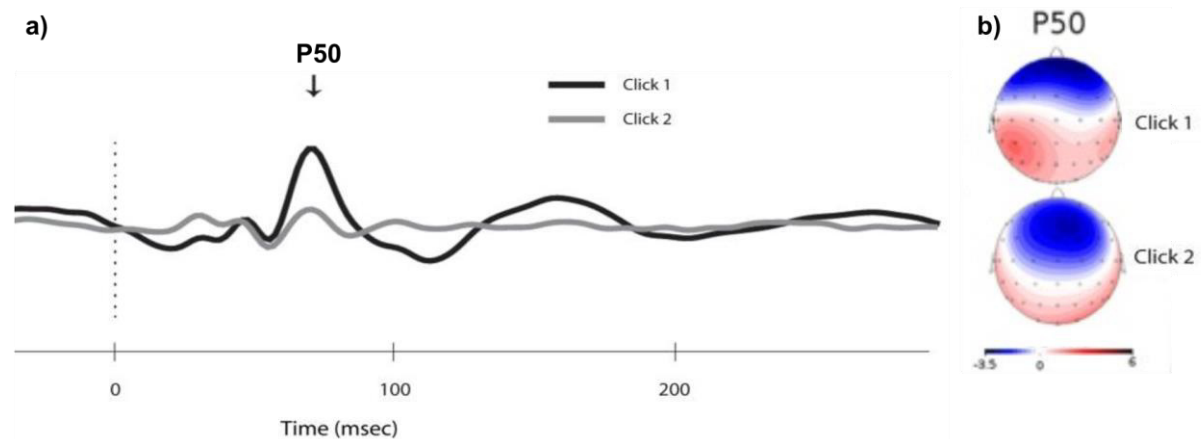


**Figure 17** : Modulation des réponses auditives évoquées par l'attention. La N1, N2 et P2 sont ici augmentées lors de la perception de sons attendus au niveau des électrodes centrales (Fz, Cz et Pz) (Woldorff & Hillyard, 1991).

### **La réponse P50**

Le cerveau traite continuellement et automatiquement un grand nombre d'informations en provenance de l'environnement. Certaines stimulations auditives comprises dans le contexte acoustique sont prédictibles car redondantes. La réponse P50, aussi appelée P1, serait un index du phénomène d'atténuation sensorielle s'appliquant aux stimuli fréquemment répétés. Cette réponse atteint son pic maximum d'amplitude à une latence d'environ 50ms suivant l'apparition d'un stimulus auditif (Fig. 18). La P50 serait générée au niveau du cortex auditif primaire et gyrus temporal supérieur (Korzyukov et al., 2007; Pantev et al., 1995; Yvert et al., 2002), mais une contribution des aires auditives associatives et des lobes frontaux dans l'émergence de cette réponse a également été mise en évidence par le passé (Edgar et al., 2003; Huutilainen et al., 1998; Weisser et al., 2001). Il a été suggéré que la réponse P50 indexerait l'action d'un mécanisme adaptatif permettant d'éviter la surcharge de traitement sensoriel (Croft et al., 2001) en contribuant notamment à l'atténuation précoce des sons répétitifs de l'environnement (Freedman et al., 1996). Cet effet s'illustre par une réduction de l'amplitude de la P50 en réponse à un son précédemment répété (effet de suppression de la P50). La P50 indexerait ainsi la capacité fonctionnelle d'un mécanisme d'inhibition permettant d'évincer le potentiel impact

du traitement sensoriel d'un son lorsqu'un son identique le précédant et actuellement en cours de traitement (phénomène de « sensory gating »). Si certaines études ont montré que l'effet de la suppression de la P50 serait corrélé aux performances attentionnelles volontaires (Cullum et al., 1993; Wan et al., 2008), d'autres rapportent des résultats inverses (Jerger et al., 1992). Il est donc possible que la P50 soit un marqueur pertinent pour l'étude de la distractibilité.



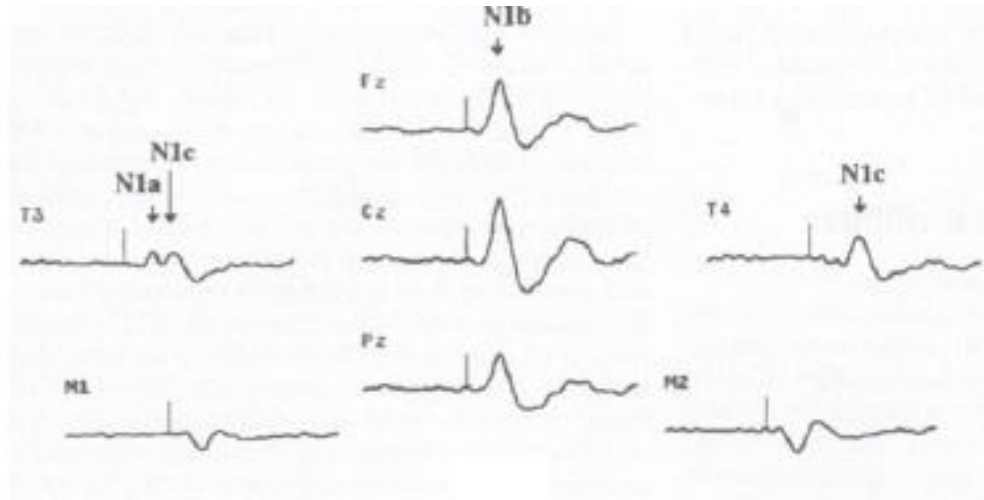
**Figure 18** : Effet de suppression de la P50. a) La réponse P50 est réduite lors de la présentation successive de deux sons identiques. La réponse au premier son est représentée par la ligne noire (click1), la réponse au second son par la ligne grise (click 2) (Yadon et al., 2009). La topographie de la réponse P50 lors de la réponse à la présentation d'un premier et second son (Terrasa et al., 2018).

### **La réponse N1**

La réponse N1 est la réponse auditive prédominante à l'âge adulte (Näätänen & Picton, 1987; Woods, 1995), elle s'observe suite à l'apparition de la P1 (voir Fig. 19). Le mécanisme indexé par la N1 contribuerait à l'identification des stimuli pertinents apparaissant dans l'environnement (Näätänen & Picton, 1987; Näätänen, 1992; Rinne et al., 2006). Cette réponse possède une première composante fronto-centrale culminante à 80ms (N1a) et générée au niveau dorsal des lobes temporaux. La seconde composante de la N1 (N1b) est localisée au niveau du vertex et atteint un pic maximum d'amplitude à une latence de 100ms ; cette réponse posséderait des générateurs temporaux et frontaux (Alcaini et al., 1994; Giard et al., 1994). Enfin, sa troisième composante principale renvoie à une réponse plus latéralement distribuée, reflétant particulièrement l'activité du gyrus temporal supérieur (N1c), et dont le pic d'amplitude s'observe à une latence de 150ms. La

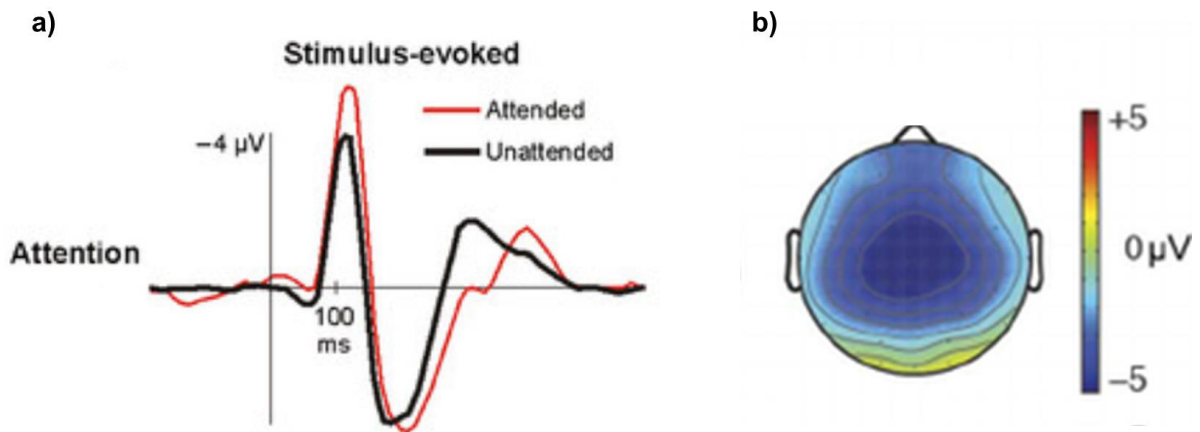


réponse N1 possède donc trois composantes (voir Fig. 19) : la N1a et la N1c sont des réponses temporales composées d'ondes négatives successives et qui sont séparées par une déflexion négative fronto-centrale, la N1b.



**Figure 19** : Composantes de la réponse N1 auditive chez l'adulte au niveau des électrodes médianes (N1b) et temporales (N1a et N1c) (Bruneau & Gomot, 1998).

La N1b est la composante de la réponse N1 la mieux documentée. Les résultats des études menées par le passé indiquent que la N1b serait élicitée en réponse à un changement acoustique marqué (par exemple l'attaque d'un son ou un changement de hauteur) il a ainsi été proposé que cette réponse reflète l'efficacité d'un mécanisme de détection du changement acoustique (Adler & Adler, 1989; Adler & Adler, 1991; Picton & Hillyard, 1974). Différents travaux utilisant des tâches d'écoute dichotique ont également montré que la N1b serait amplifiée en réponse à des sons pertinents lorsque l'attention est préalablement portée sur la position spatiale de ces sons (Giard et al., 2000; Hillyard et al., 1995; Hink & Hillyard, 1976; Woldorff & Hillyard, 1991) (voir Fig. 20).



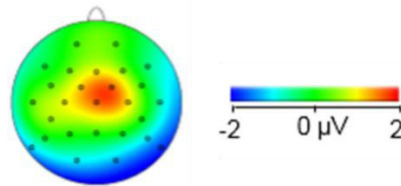
**Figure 20** : Réponse cérébrale N1 et attention. **a**, L'amplitude de la N1 est plus importante lorsque le son est attendu (ligne rouge) plutôt que non attendu (ligne noire) (Schröger et al., 2015). **b**, Topographie de la réponse N1 en réponse à un son attendu (Kasper et al., 2014).

D'autres études basées sur des tâches de type Oddball rapportent que l'amplitude de la N1b serait plus particulièrement importante en réponse à des sons déviants non pertinents comparés à des sons standards (Berti, 2013; Näätänen & Picton, 1987; Schröger et al., 2015), ou encore qu'une amplitude réduite de la N1b en réponse à des sons distracteurs est associée à une amélioration des performances dans une tâche de mémoire de travail (Giuliano et al., 2014). Ces résultats suggèrent que l'attention volontaire et involontaire modulent les traitements précoces de l'information auditive via le mécanisme de détection du changement indexé par la N1b. Pris dans son ensemble, la réponse N1 reflète donc une des premières étapes du filtrage attentionnel de l'information auditive.

### ***Le complexe P2-N2***

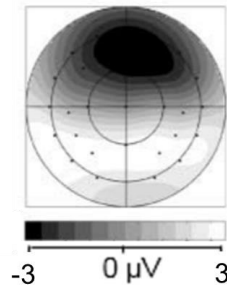
La réponse auditive P2, à topographie fronto-centrale, se traduit par une déflexion positive survenant environ 180ms après la perception d'un son (Crowley & Colrain, 2004). Les études portant sur la réponse P2 sont plus rares que celles portant sur la N1. Les générateurs de la P2 seraient localisés au sein des aires auditives primaires et secondaires (Godey et al., 2001; Hari et al., 1987; Scherg et al., 1989; Yvert et al., 2005), mais d'autres aires cérébrales pourraient contribuer à son émergence (Crowley & Colrain, 2004). L'amplitude de cette réponse varie selon les caractéristiques intrinsèques du stimulus, comme son intensité (Näätänen & Picton, 1987) ou sa fréquence (Yingling & Nethercut, 1983). Il a été proposé que la P2 pourrait refléter l'action d'un mécanisme de

traitement de l'information auditive de plus haut niveau que celui indexé par la N1b (Crowley & Colrain, 2004). D'autres travaux ont également proposé que la N1 et la P2 pourraient représenter deux manifestations liées à la composante dite « vertex potential » (Zerlin & Davis, 1967). Cependant, plusieurs études montrent que les réponses N1 et P2 peuvent bien être dissociées selon leurs trajectoires développementales ou selon certaines conditions expérimentales (Crowley & Colrain, 2004).



**Figure 21** : Topographie de la P2 en réponse lors de la perception d'un son (Rentzsch et al., 2015).

La N2 est une réponse s'observant pour des stimuli non-cibles présentés de manière répétitive au sein d'une séquence d'évènements cibles (Näätänen & Picton, 1987). L'amplitude maximum du pic de cette onde est localisé au niveau fronto-central, et présente une latence comprise entre 250 et 400ms pour les stimuli auditifs. La N2 présente plusieurs composantes : la N2a qui fait référence à la « Mismatch Negativity », la N2b et la N2c (Patel & Azzam, 2005). Les générateurs de la N2 seraient localisés au niveau du cortex cingulaire, du lobe frontal et le cortex temporal supérieur (Folstein & Van Petten, 2008). A ce jour, le rôle fonctionnel de la N2 ne fait pas l'objet d'un consensus. Plusieurs travaux suggèrent néanmoins que la N2 pourrait indexer l'efficacité d'un mécanisme inhibiteur intervenant lors de tâches induisant une situation de conflit cognitif (e.g. tâches dites « stop signal » ou « GoNoGo ») : cette réponse serait un possible marqueur de l'efficacité de contrôle attentionnel (Dimoska et al., 2006; van Boxtel et al., 2001). Bien que le rôle des réponses P2 et N2 reste imprécis, ces réponses pourraient être des marqueurs pertinents pour caractériser l'origine cérébrale de la distractibilité.



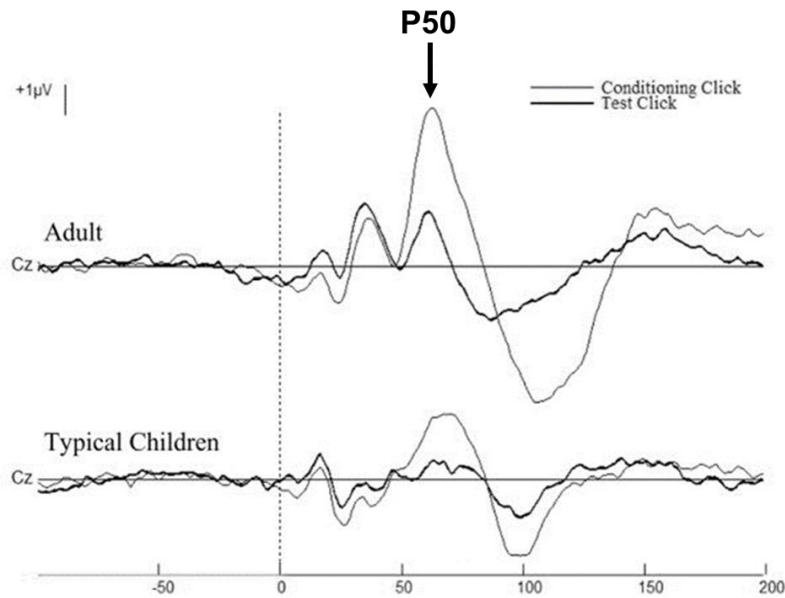
**Figure 22** : Topographie de la N2 en réponse à un son (Goller et al., 2009).

## *ii. Développement des réponses cérébrales auditives*

Chez l'enfant, les réponses EEG suivant l'apparition d'un stimulus auditif sont parfois différentes de celles susmentionnées, observables chez l'adulte.

### ***Développement de la réponse P50***

La P50 est une réponse cérébrale observable dès le plus jeune âge. Le phénomène d'atténuation de la P50 en réponse à des stimuli répétés a été observé chez l'enfant de 1 à 4 mois (Kisley et al., 2003). Si ceci suggère un développement très précoce de la capacité à inhiber le traitement de stimuli auditif répétés, il existe toutefois des divergences concernant la trajectoire développementale de l'effet d'atténuation de la P50. Certains travaux ont rapporté une augmentation de cet effet d'atténuation et de la latence de la P50 entre 1 et 8 ans, suggérant une amélioration de l'inhibition auditive durant l'enfance (Brinkman & Stauder, 2007; Robert Freedman et al., 1987; Marshall et al., 2004; Myles-Worsley et al., 1996). Bien que basés sur des paradigmes similaires, d'autres résultats suggèrent que la P50 serait mature avant l'âge de 5 ans (Davies et al., 2009).

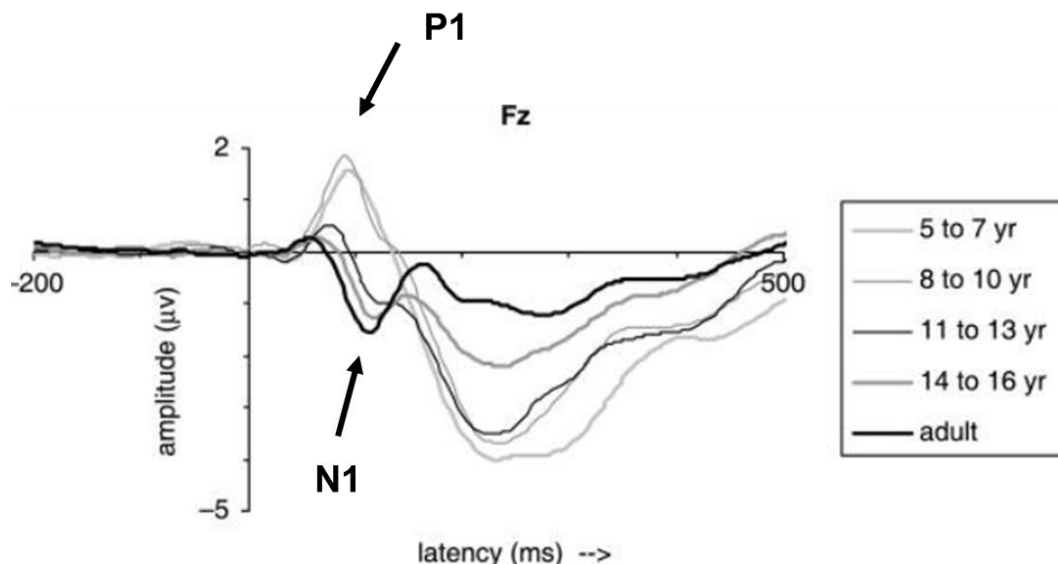


**Figure 23** : Phénomène de suppression de la réponse P50 chez l'enfant et l'adulte. Indépendamment de l'âge, La réponse P50 est réduite lors de la présentation successive de deux sons identiques. La réponse au premier son est représentée par la ligne grise (conditioning click), la réponse au second son par la ligne noire (test click) (Davies et al., 2009).

### ***Développement de la réponse N1***

Le complexe N1 en réponse à la présentation d'un son connaît un développement progressif de l'enfance à l'âge adulte. A partir de 4 ans, les enfants présentent une réponse positive dont le pic maximum d'amplitude est observable à une latence comprise entre 100 et 300ms. Cette réponse, aussi dite P1, est la réponse sensorielle auditive prédominante à l'âge préscolaire. La latence de la P1 varie avec l'âge : chez les nouveaux nés la latence de la P1 est d'environ 300ms, elle décroît ensuite rapidement jusqu'à 3 ans, puis, progressivement de l'âge préscolaire à l'âge adulte, la latence de la P100 mature et se stabilise aux alentours de 60ms (Sharma et al., 1997; Sharma et al., 2005). La latence de la P1 est supposée refléter la somme des délais synaptiques au travers des voies du système nerveux périphérique et central (Eggermont et al., 1997). Durant l'enfance et l'adolescence, la réponse P1 connaît une diminution progressive de sa latence et de son amplitude jusqu'à l'âge adulte suggérant un développement progressif du mécanisme de détection des changements acoustiques indexés par cette réponse (Ceponiene et al., 1998; Ponton et al., 2002; Sharma et al., 1997). L'effet de l'attention volontaire sur la P1 se traduit par une augmentation de son amplitude. Cet effet attentionnel ne serait pas observable avant l'âge adulte (Karns et al., 2015): ceci suggère que certains corrélats

cérébraux de l'attention volontaire seraient encore immatures durant l'adolescence. Par ailleurs, la P1 se développe plus lentement que la N1 (Ponton et al., 2000; Sharma et al., 2005).



**Figure 24** : Modulation du complexe P1-N1 en réponse à un son de l'enfance à l'âge adulte. Du plus clair au plus foncé, les lignes représentent les réponses cérébrales des enfants de 5-7, 8-10, 11-13, 14-16 ans et des adultes (Bishop et al., 2007).

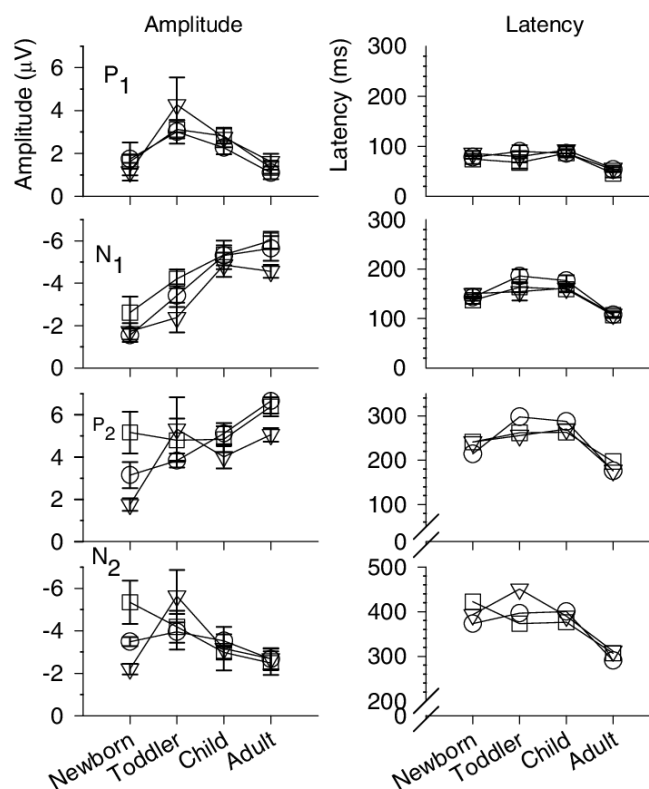
Durant l'âge scolaire, la N1 est observable à une latence de 80-200ms lors de la présentation de stimuli auditifs à une fréquence de 1 Hz ou plus (Bruneau et al., 1997; Ceponiene et al., 1998; Paetau et al., 1995): cette réponse sera la réponse sensorielle auditive prédominante jusqu'à l'adolescence. La composante N1b et N1c sont prédominantes respectivement chez l'adulte et chez l'enfant de 4 à 8 ans (Bruneau et al., 1997). A cet âge, la N1c à topographie temporelle est plus tardive que chez l'adulte et culmine aux alentours de 170ms. Chez l'adulte, les composantes de la N1 sont différemment affectées par l'intensité du son (Picton et al., 1970; Prescott et al., 1984) : si l'intensité des stimuli sonores est importante, l'amplitude de la N1c augmente chez l'enfant, tandis que sa latence diminue (Ponton et al., 2000). De 4 à 8 ans, au niveau central, la N1b présente une amplitude réduite comparée à la N1c, mais s'avère moins variable. La réponse N1b culmine au niveau fronto-central entre 4 et 6 ans, puis au niveau du vertex entre 6 et 8 ans (Bruneau et al., 1997). Les changements d'amplitude relatifs à la N1b refléteraient le développement de la distribution des potentiels de scalp, marquant une transition de négativité progressive des sites frontaux à centraux au court de l'enfance (Bruneau et al., 1997; Bruneau & Gomot, 1998). Toutefois, lorsque le paradigme expérimental utilisé emploie un intervalle inter-stimulus inférieur à 1 Hz, la réponse N1b

n'est pas systématiquement observable avant 9 ans (Ponton et al., 2000). Dans leur ensemble, les résultats des études menées par le passé indiquent que la réponse N1b deviendrait robuste entre 9 et 13 ans (Albrecht et al., 2000; Karns et al., 2015; Ponton et al., 2000; Sharma et al., 1997). Par la suite, durant l'adolescence les modulations développementales de la N1b se caractériseraient par une diminution et une augmentation respective de sa latence et de son amplitude (Fitzroy et al., 2015; Johnstone et al., 1996; Mahajan & McArthur, 2012; Oades et al., 1997). Ces changements en termes d'amplitude et de latence reflèterait le développement progressif, de l'enfance à l'âge adulte, des processus d'identification de l'information auditive. Chez l'adulte, l'effet de l'attention sur ces processus se traduit par une augmentation de l'amplitude de la N1b par l'attention volontaire : certaines études rapportent que cet effet ne serait observable durant l'enfance uniquement lors de la perception de sons linguistiques (Karns et al., 2015), tandis que d'autres études avancent que l'attention augmenterait l'amplitude de la N1b en réponse à des sons non linguistiques entre 12 et 14 ans (Loiselle et al., 1980). Ces résultats contradictoires soulignent que la trajectoire développementale de la N1 reste à ce jour mal définie ; étudier finement le développement de cette réponse pourrait néanmoins permettre de mieux comprendre l'origine de la distractibilité accrue chez l'enfant.

### ***Développement du complexe P2-N2***

Si la P2 est une réponse visible chez l'adulte, elle est en revanche plus difficilement observable chez l'enfant. Certaines études rapportent néanmoins qu'une augmentation de l'amplitude de la P2 par l'attention volontaire serait observable à partir de l'âge 10 ans, et que sa latence augmenterait progressivement de l'enfance à l'âge adulte (Karns et al., 2015). Avant cet âge, le potentiel évoqué auditif tardif prédominant durant l'enfance serait la N250 (Ceponiene et al., 1998; Korpilahti & Lang, 1994; Kurtzberg et al., 1995; Shafer et al., 2000); cette réponse serait notamment corrélée avec la N1 durant l'enfance (Edgar et al., 2015; Kushnerenko et al., 2002; Ponton et al., 2000). Elle présente une topographie fronto-centrale et s'accompagne d'une inversion de polarité au niveau temporel inférieur : elle présenterait en cela des similarités avec la N1b de l'adulte (Bruneau & Gomot, 1998). L'amplitude et la latence de la N250 serait stables durant l'enfance, mais sa latence diminuerait durant l'adolescence (Ponton et al., 2000). La N250 serait par exemple d'amplitude plus importante à l'écoute de sons musicaux chez les enfants musiciens comparés à d'autres non musiciens (Hyde et al., 2009). Le rôle fonctionnel et l'origine de

la N250, dont le développement est très peu documenté dans la littérature, restent à ce jour mal définis (Takeshita et al., 2002).



**Figure 25** : Changement de l'amplitude et de la latence de la N1, P1, N2 et P2 en réponse à un son de l'enfance à l'âge adulte. Les réponses cérébrales ont été enregistrées chez le nouveau-né (newborn : < 1 an), l'enfant d'âge préscolaire (toddler : 2 ans), l'enfant d'âge scolaire (child : 5 ans) et chez l'adulte (Wunderlich et al., 2006).

### iii. Réponses cérébrales attentionnelles chez l'adulte

#### La réponse CNV

Une signature cérébrale EEG est associée à la mise en place de ce processus d'anticipation chez l'adulte : la CNV (dite « Contingente Negative Variation »). Cette réponse s'observe notamment lors de tâches sollicitant l'orientation attentionnelle et la préparation motrice ; elle est considérée comme un marqueur cérébral robuste de l'effort lié au maintien de l'attention durant la période préalable à la détection d'une cible.

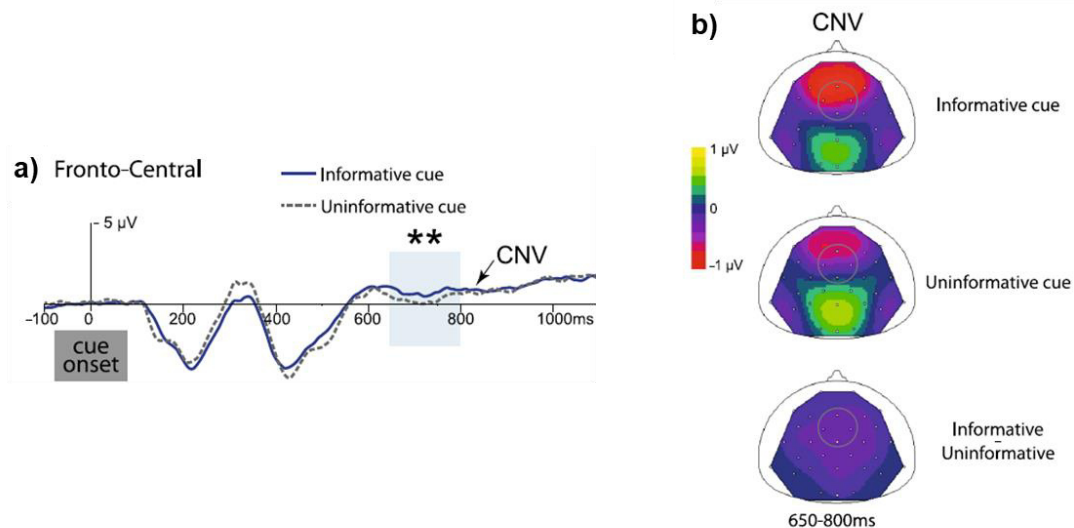
La CNV est une réponse négative lente dont le pic d'amplitude émerge à une latence comprise entre 200 et 550ms ; elle se développe durant l'intervalle séparant un indice



annonçant l'apparition d'un stimulus pertinent (Walter et al., 1964). Chez l'adulte, lorsque le délai séparant l'indice et la cible est compris entre 3 et 4s, la CNV comporte deux composantes : une composante précoce fronto-centrale qui indexerait l'enclenchement d'un mécanisme de préparation attentionnelle, et une composante plus tardive à topographie centro-pariétale qui traduirait pour sa part l'action d'un mécanisme de préparation motrice (Brunia & van Boxtel, 2001; Loveless & Sanford, 1974; Tecce, 1972; Weerts & Lang, 1973). Parallèlement, différentes études ont montré que la CNV posséderait des générateurs situés au niveau des cortex frontaux et des aires associatives, ainsi qu'au niveau du cortex prémoteur (Basile et al., 2002, 2006; Brunia & van Boxtel, 2001; Hultin et al., 1996; Leynes et al., 1998; Praamstra et al., 2006). La préparation attentionnelle est soumise au contrôle attentionnel exécutif dont l'efficacité dépend majoritairement de l'intégrité fonctionnelle des lobes frontaux (Fuster, 2000; Joaquín Fuster, 2017; Stuss & Benson, 1984) et permet de préparer la détection cognitive rapide de la cible. La phase de préparation motrice permet en revanche - et comme son nom l'indique - d'optimiser la réponse motrice à réaliser une fois la cible détectée. Cette composante motrice de l'anticipation dépend des aires motrices, prémotrices et motrices supplémentaires du cortex frontal dont l'activité peut être modulée par le niveau d'alerte. En plus des différentes contributions corticales susmentionnées, l'activité de certaines structures sous corticales comme les ganglions de la base ainsi que le thalamus, et plus particulièrement son noyau réticulaire, contribuent également à l'émergence de la CNV (Brunia & van Boxtel, 2001).

Pris dans leur ensemble, les résultats des travaux réalisés par le passé indiquent que l'amplitude de la CNV augmente en réponse à un indice valide comparé à un indice neutre (Bidet-Caulet et al., 2015; Brunia & van Boxtel, 2001; Gómez et al., 2007) ou lorsque la charge cognitive liée à la tâche est importante (Falkenstein et al., 2003). La CNV peut donc être considérée comme un marqueur des processus cognitifs en lien avec l'anticipation attentionnelle et la préparation motrice. D'un point de vue théorique, ces processus seraient liés au système d'alerte contribuant à l'orientation attentionnelle selon le modèle de Posner : en ce sens, il n'est pas surprenant de constater que des modulations de l'amplitude de la CNV s'observent lorsque le paradigme expérimental vise à faire varier le niveau d'alerte des participants (Cudo et al., 2018; Lumsden et al., 1986; Joseph Tecce, 1971). Par ailleurs, la CNV serait sujette à un phénomène d'habituation se traduisant par une diminution de son amplitude au cours du temps lorsque les conditions de l'expérience sont prédictibles (Kononowicz & Penney, 2016). Dans cette même ligne d'idée, il a également été proposé que la CNV refléterait l'accumulation d'estimations temporelles

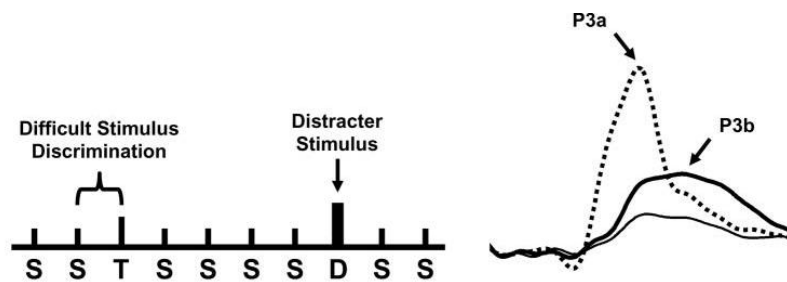
permettant de prédire le moment de survenue d'une cible pour y répondre le plus rapidement possible (van Rijn et al., 2011). Dans son ensemble, la CNV reflète donc le déploiement de l'anticipation attentionnelle volontaire : cette réponse cérébrale constitue donc un marqueur pertinent pour l'étude des corrélats cérébraux de la distractibilité.



**Figure 26** : Modulation de la CNV par l'attention lors d'une tâche de type Posner. a) L'amplitude la CNV est augmentée en réponse à un indice informatif (informative cue) comparé à un indice non informatif (uninformative cue). b) Topographies de la CNV en réponse à un indice informatif, non informatif et contraste de ces deux conditions (Bidet-Caulet et al., 2015).

### **Le complexe P3**

La réponse P3 survient en réponse à la détection d'un son non cible, ou cible, à une latence d'environ 300ms. La distribution de la P3 au niveau du scalp se caractérise par les changements de potentiel au niveau des électrodes médiales (notamment Fz, Cz et Pz) qui se traduisent typiquement par une augmentation de magnitude du signal progressant des territoires frontaux à pariétaux (Johnson, 1993). Plus qu'une simple entité, ce potentiel est considéré comme un ensemble de réponses reflétant le traitement attentionnel d'un stimulus. La P3 présente deux constituantes distinctes : la P3a et la P3b (Squires et al., 1975).



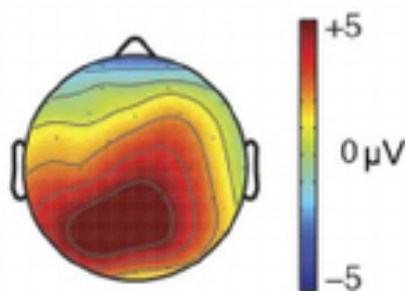
**Figure 27** : Dissociation des composantes P3a et P3b en réponse à un son distracteur. Dans ce paradigme de type Oddball, un son distracteur est inséré dans des séquences de sons standards (S) et de sons cibles (T) difficilement discriminables (Polich, 2007).

La P3b, élicitée en réponse à un son pertinent, s’observe au niveau pariétal à une latence comprise entre 350 et 450 ms ; les cortex frontaux, cingulaires et pariétaux contribueraient particulièrement à l’émergence de cette réponse (Bachiller et al., 2015; Volpe et al., 2007; Wronka et al., 2012).



**Figure 28** : Générateurs de la P3b en réponse à un son cible (Wronka et al., 2012).

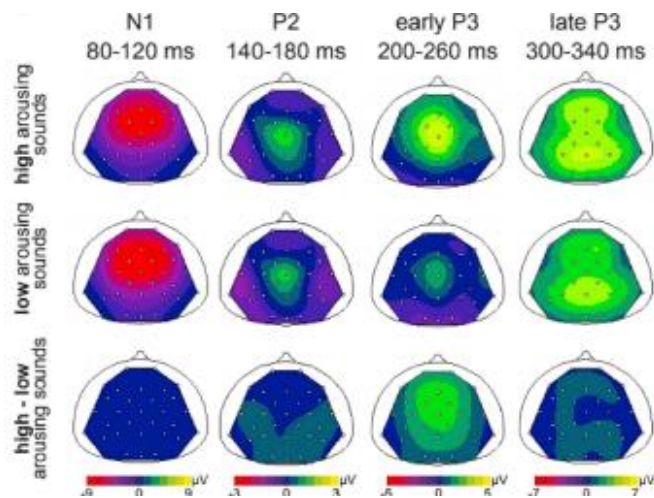
La P3b a été étudiée à l’aide de paradigmes présentant des sons cibles, plutôt rares, à détecter au sein de séquences ou d’arrière-plan sonores comprenant des stimuli non pertinents (e.g. paradigme Oddball), mais aussi par le biais de tâches de détection de sons cibles isolés ou encore de variantes du paradigme de Posner. L’amplitude de la réponse P3b à une cible diminue si un indice la précédant véhicule des informations sur sa position spatiale ou lorsque la probabilité d’apparition du stimulus cible est importante (Arnott & Alain, 2002; Bidet-Caulet et al., 2015; Golob et al., 2002; Masson & Bidet-Caulet, 2019; Sutton et al., 1965; Teder-Sälejärvi & Hillyard, 1998). A ce jour, et bien que le rôle de la P3b dans le traitement attentionnel ne fasse pas l’objet d’un consensus, cette réponse cérébrale est considérée comme reflétant le déclenchement de mécanismes d’évaluation et d’orientation attentionnelle volontaire (Polich, 2007). Par conséquent, la P3b est un marqueur de l’attention volontaire particulièrement pertinent pour étudier l’origine cérébrale de la distractibilité.



**Figure 29** : Topographie de la réponse P3b en réponse à un son attendu (Kasper et al., 2014).

La P3a, particulièrement étudiée grâce aux paradigmes de type Oddball, est un complexe composé d'un premier pic fronto-central à une latence d'environ 250 ms (P3 précoce, aussi dite « early-P3 » ou simplement « P3a »), puis d'un second pic fronto-pariétal à une latence d'environ 320ms (P3 tardive, aussi dite « late-P3 » ou « novelty-P3 ») ; ces deux types de réponses surviennent suite à la perception de sons non cibles, déviant ou nouveaux (Yago et al., 2003). La nomenclature des deux composantes de la P3a n'est pas consensuelle à ce jour (Barry et al., 2020; Masson & Bidet-Caulet, 2019). Tout au long de ce manuscrit, la P3a précoce et tardives seront respectivement désignées sous les termes de « P3a-p » et « P3a-t », tandis que le terme « complexe P3a » renverra à la réponse P3a étudiée lorsqu'aucune distinction n'est faite entre composante précoce et tardive de la P3a.

La P3a-p s'observe en réponse à des sons déviant et non pertinents survenant dans l'environnement. Cette réponse est communément considérée comme une mesure cérébrale directe de la capture attentionnelle involontaire (Escera, Alho, et al., 2000; Escera et al., 1998; Polich, 2007; SanMiguel, Linden, et al., 2010; Schröger & Wolff, 1998) et serait générée au niveau du cortex frontal, cingulaire et pariétal, notamment dans l'hémisphère droit (Bachiller et al., 2015; Volpe et al., 2007; Wronka et al., 2012). Certains résultats laissent néanmoins penser que la P3a-p ne serait un marqueur uniquement sensible à l'influence de l'attention involontaire car les modulations de son amplitudes ne corrèlent pas nécessairement avec les mesures de la distraction fournies via l'utilisation de paradigme Oddball (SanMiguel et al., 2008). Ainsi, il a également été suggéré que la P3a-p pourrait être un marqueur de l'alerte phasique (Masson & Bidet-Caulet, 2019a; Pineda et al., 1989) (voir Fig. 30).



**Figure 30** : Topographie des réponses N1, P2, P3a-p (early P3) et P3b (late P3) en réponse à son distracteur. Le distracteur peut être considéré comme induisant une forte (high arousing) ou faible (low arousing) augmentation d'alerte phasique. Le contraste entre les condition fort et faible alerte phasique (high – low) montre que l'alerte influence notamment la distribution de scalp de la réponse P3a-p (Masson & Bidet-Caulet, 2019).

La P3a-t s'observe en réponse à des sons nouveaux, soit des sons apparaissant rarement dans l'environnement acoustique alentour (Courchesne et al., 1975). Cette réponse est particulièrement sujette aux effets d'habituation, et voit son amplitude réduite lorsque les stimuli nouveaux sont assez fréquents ou que leur moment d'apparition est hautement prédictible (Barry et al., 2016). La P3a-t serait le marqueur d'une réponse attentionnelle involontaire spécifiquement orientée vers les stimuli nouveaux (Barry et al., 2016; Friedman et al., 2001) et serait générée au niveau dorsal du cortex frontal, du cortex cingulaire et pariétal au niveau bilatéral (Barry et al., 2020).

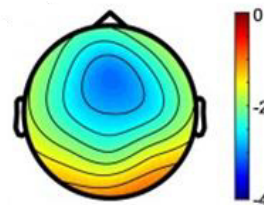


**Figure 31** : Générateurs du complexe P3a en réponse à un son distracteur (Wronka et al., 2012)

Bien que possédant plusieurs composantes pouvant survenir de manière co-occurrence et dans des proportions différentes, le complexe P3 reflète dans son ensemble la signature cérébrale de processus d'orientation attentionnelle volontaires et involontaires. Cette réponse constitue donc un marqueur d'intérêt lorsqu'il s'agit de caractériser la dynamique cérébrale à l'origine de la distractibilité.

## La réponse RON

Lorsque l'attention est involontairement capturée et orientée vers un stimulus distracteur, il est alors nécessaire de la réorienter vers son objet initial de sorte à ne pas rester focaliser sur le dit distracteur. La signature du mécanisme attentionnel volontaire permettant cette action cognitive se reflèterait au travers de la réponse RON (aussi dite « Reorienting Negativity ») (Horváth, Winkler, et al., 2008b; Schröger & Wolff, 1998). La RON est un potentiel négatif, à distribution fronto-centrale et au pic d'amplitude émergeant à une latence comprise entre 400 et 600ms suivant l'apparition d'un distracteur (voir Fig. 32).



**Figure 32** : Topographie de la RON suite à l'apparition d'un son distracteur (Justo-Guillén et al., 2019).

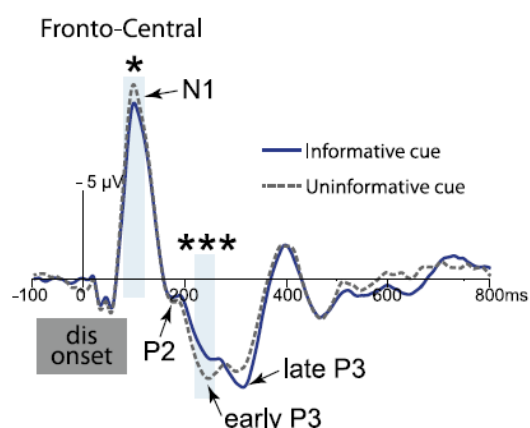
Le rôle de la RON dans le fonctionnement attentionnel a été moins étudié que celui de la CNV ou des différentes composantes de la P3. La RON est en effet uniquement observable lors de tâches actives comprenant un délai distracteur-cible permettant sa mise en place (i.e. relativement long). Certaines études rapportent une réduction de l'amplitude de la RON lorsque les stimuli distracteurs sont précédés d'indice informatifs (Horváth et al., 2011; Sussman et al., 2003; Wetzels et al., 2009). Il a été suggéré que la RON serait un marqueur de la réallocation des ressources attentionnelles vers les stimuli pertinents pour réaliser une tâche en cours (Hölig & Berti, 2010; Schröger et al., 2000; E. Schröger & Wolff, 1998), mais que cette réponse pourrait également refléter l'action d'un mécanisme de restauration, en mémoire de travail, de l'objectif de la tâche initiale suite à la détection d'un distracteur (Berti, 2008). Bien que très peu d'études permettent de retracer l'origine de la RON, certains travaux avancent que cette réponse cérébrale serait partiellement issue de l'activité des aires pré-motrices (Horváth, Maess, et al., 2008). Par ailleurs, la RON pourrait présenter une composante précoce (aux alentours de 400ms) et une plus tardive (aux alentours de 700ms), mais ce sujet reste actuellement peu

documenté et la caractérisation fonctionnelle de ces deux composantes reste imprécise (Berti, 2008; Escera et al., 2001; Munka & Berti, 2006).

### **Mesures cérébrales de la distractibilité**

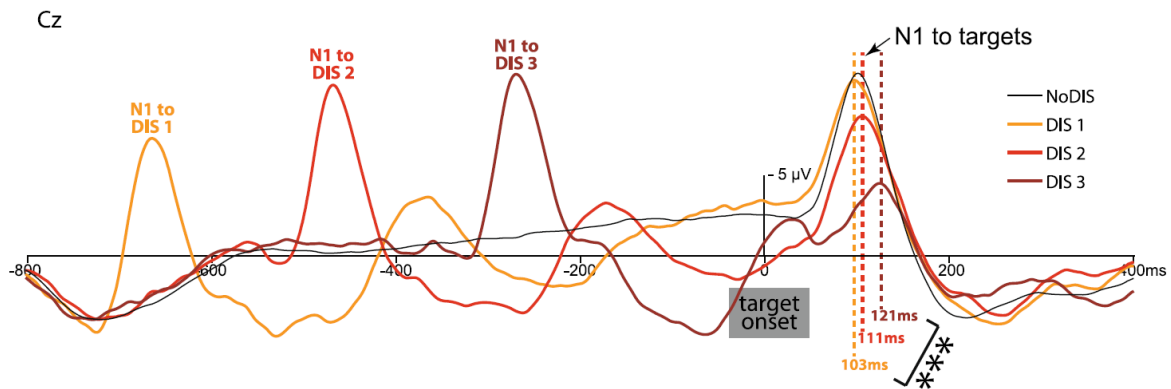
En utilisant le paradigme CAT décrit précédemment dans ce manuscrit (voir section I, p. 29), une étude récemment réalisée chez l'adulte a permis de caractériser la dynamique des réponses cérébrales associées aux facettes attentionnelles contribuant à la distractibilité.

Les résultats de cette étude indiquent que le déploiement de l'attention volontaire sur la tâche se traduirait par une augmentation de l'amplitude de la CNV en réponse à un indice informatif plutôt que non informatif. Cette augmentation de la CNV est associée à une réduction de l'amplitude de la P3b aux cibles auditives, suggérant que le déploiement de l'attention volontaire contribue à l'optimisation du traitement de la cible. Par ailleurs, cette étude montre que les facettes attentionnelles volontaires et involontaires interagissent lors du traitement cérébral des stimuli distracteurs. L'amplitude de la N1 et de P3a-p en réponse aux sons distracteurs sont en effet réduites lorsque l'indice est informatif plutôt que non informatif. Ceci suggère que le déploiement attentionnel volontaire contribue à la réduction du traitement involontaire des stimuli non pertinents (Fig. 33).



**Figure 33** : Modulations de la N1, P2, complexe P3 à un son distracteur par l'attention volontaire dans le paradigme CAT. La N1 et la P3a-p au distracteur est réduite lorsque l'indice est informatif (informative cue) plutôt que non informatif (uninformative). Ces effets indiquent que l'attention volontaire et involontaire interagissent (Bidet-Caulet et al., 2015).

De plus, il a été observé, dans cette étude, que la latence de la N1 à la cible augmente plus le son distracteur est proche de la cible (Fig. 34). Ce résultat suggère que l'attention involontaire pourrait impacter les processus attentionnels volontaires en ralentissant le traitement des stimuli auditifs considérés comme pertinents.



**Figure 34** : Réponse N1 aux cibles précédées par des distracteurs dans le paradigme CAT. La latence de la N1 augmente lorsque le distracteur est proche de la cible (Dis1 : distracteur proche de l'indice, Dis2 : distracteur entre l'indice et la cible, Dis3 : distracteur proche de la cible) (Bidet-Caulet et al., 2015).

L'ensemble de ces résultats de cette étude s'appuyant sur le test CAT montre que les processus attentionnels volontaires et involontaires interagissent dans le cerveau. Ceci souligne qu'il est nécessaire, pour évaluer le niveau de distractibilité, de mesurer simultanément attention volontaire et involontaire. Les études développementales réalisées par le passé se sont toutefois majoritairement intéressées à l'attention volontaire et involontaire de manière dissociée. Bien que la contribution de ces travaux ait permis de mieux comprendre comment certains corrélats cérébraux de l'attention se développent, ils n'ont cependant pas permis de caractériser finement le développement cérébral des différentes composantes attentionnelles de la distractibilité et de leurs interactions. L'enregistrement de l'activité EEG d'enfants réalisant le test CAT, ainsi que l'analyse des différentes réponses auditives et attentionnelles décrites dans cette section et la suivante, pourrait permettre de révéler l'origine cérébrale de la distractibilité accrue observable durant l'enfance.

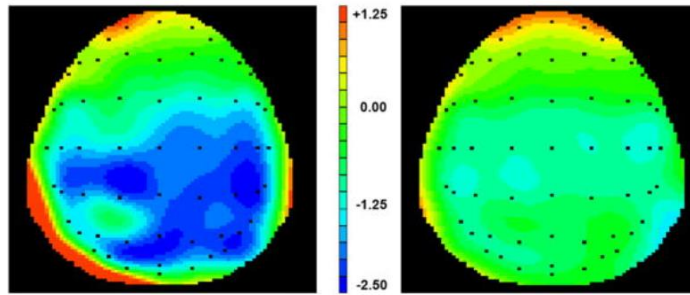
#### *iv. Développement des réponses cérébrales attentionnelles*

Chez l'enfant, les réponses cérébrales attentionnelles évoquées précédemment présentent des trajectoires développementales différentes.



## ***La réponse CNV***

La CNV est un marqueur de la préparation motrice et attentionnelle volontaire se développant de l'enfance à l'âge adulte. L'amplitude de cette réponse augmente progressivement durant l'enfance et l'adolescence (Bender et al., 2005; Jonkman, 2006; Timsit-Berthier & Hausman, 1972). Avant l'âge de 3 ans la CNV n'est pas observable ; elle s'avère toutefois identifiable chez l'enfant de 3 à 7 ans, ceci notamment lorsque la tâche réalisée est considérée comme motivante pour ce type de population (Tecce, 1971; Walter, 1966). De 8 à 15 ans, la CNV serait toujours immature, mais pourrait s'apparenter à celle de l'adulte si la tâche réalisée implique un certain niveau de compétition, motivant ainsi les enfants à obtenir de bonnes performances (Tecce, 1971; Walter, 1966). Plusieurs travaux ont par ailleurs mis en exergue l'existence d'une dissociation développementale concernant les composantes précoce et tardive de la CNV. Certains résultats suggèrent en effet que la CNV précoce se développerait progressivement de 9 à 17 ans (Jonkman et al., 2003; Perchet & Garcia-Larrea, 2005; Perchet & Garcia-Larrea, 2000; Segalowitz et al., 1992; Thillay et al., 2015), tandis que sa composante tardive se développerait de 6 à 9 ans pour ensuite prendre une forme similaire à celle de l'adulte (Bender et al., 2005; Jonkman et al., 2003; Segalowitz et al., 1992). La topographie de cette réponse évoluerait également au cours du développement : à partir de 12 ans, la distribution de la CNV devient plus importante au niveau frontal et diminue au niveau des territoires pariétaux (voir Fig. 35); avant cet âge, la distribution de la CNV tardive serait plus diffuse au niveau du scalp et ne deviendrait robuste qu'aux alentours de 8 ans (Bender et al., 2005; Padilla et al., 2014; Tecce, 1971; Thillay et al., 2015). Le développement structurel des lobes frontaux entraîne un gradient antéro-postérieur de maturation fonctionnelle qui permet peu à peu à l'enfant d'améliorer ses capacités de contrôle cognitif. Ces changements développementaux se traduiraient par un développement précoce des aspects moteurs de l'anticipation vers 8-10 ans, tandis que la composante attentionnelle de l'anticipation continuerait à se développer jusqu'à l'âge adulte. Le développement tardif de la composante attentionnelle de la CNV entraîne une difficulté naturelle chez l'enfant et l'adolescent à se préparer à répondre à un stimulus pertinent ; ceci pourrait de fait contribuer à expliquer la présence d'une distractibilité accrue chez l'enfant.

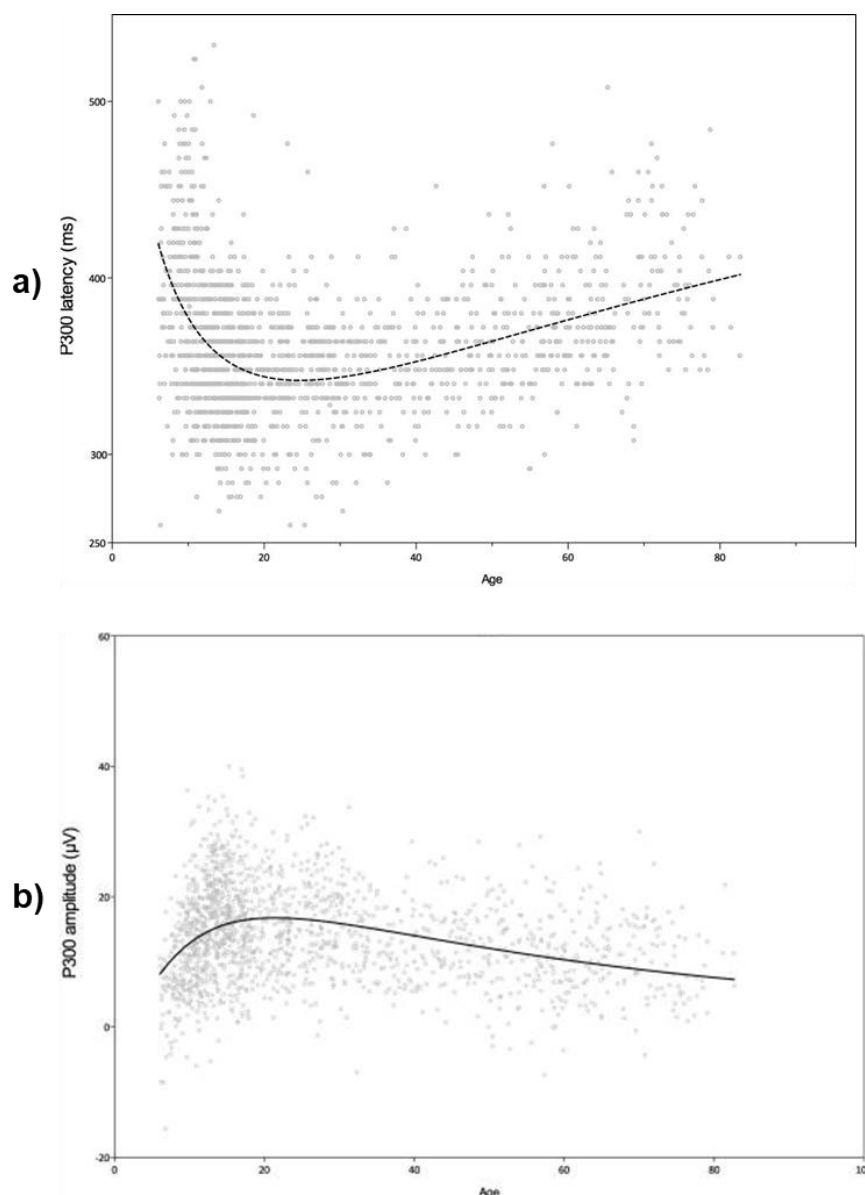


**Figure 35** : Topographie de la CNV en fonction de l'âge. La distribution de la CNV est plus pariétale chez l'enfant de 11-13 ans (partie gauche) que chez l'adolescent de 14-18 ans (partie droite (*Padilla et al., 2014*)).

### ***Le complexe P3***

La réponse P3b reflète le traitement et l'évaluation attentionnelle des stimuli pertinents. Pris dans leur ensemble, les études des PE à un stimulus pertinent indiquent, chez l'enfant, qu'une variante de cette réponse serait observable durant les premiers mois de la vie (McIsaac & Polich, 1992; Riggins & Scott, 2020) ; la présence d'une réponse positive à amplitude maximum entre 300 et 600 ms post cible serait par ailleurs observable chez l'enfant d'âge préscolaire et scolaire (Riggins & Scott, 2020). Cette réponse connaît une réduction de sa latence de 3 à 18 ans tandis que les RT aux stimuli cibles diminuent (Courchesne et al., 1981; Finley et al., 1985; Fuchigami et al., 1993; Kurtzberg et al., 1979). Si la réduction de la latence de la P3b est un résultat consistant dans la littérature existante, la caractérisation des modulations de son amplitude au cours du développement reste imprécise. Les travaux portant sur le développement de la P3b dans le domaine visuel rapportent une augmentation progressive et non marquée de l'amplitude de la P3b ; dans la modalité auditive la P3b serait mature plus précocement et donc plus aisément observable : l'amplitude de la P3b auditive augmenterait drastiquement durant l'enfance et l'adolescence (Riggins & Scott, 2020; Segalowitz, Santesso, & Jetha, 2010). Certains résultats suggèrent ainsi qu'une augmentation de l'amplitude de la P3b serait corrélée à une augmentation de la capacité de traitement de l'information (Polich et al., 1990) tandis que d'autres suggèrent que ce changement d'amplitude à travers l'âge serait relatif aux caractéristiques physiques du stimulus cible (Dinteren et al., 2014). Tous les travaux réalisés s'accordent néanmoins à conclure que les enfants présentent des effets attentionnels observables grâce à la P3b, se traduisant notamment par une augmentation de son amplitude en réponse à des stimuli attendus plutôt qu'à des stimuli à ignorer (Goodin et al., 1978; Riggins & Scott, 2020; Sanders & Zobel, 2012). La topographie de la P3b connaîtrait enfin des changements développementaux. Cette réponse serait plus

diffuse au niveau central et pariétal durant l'enfance, tandis qu'à l'âge adulte, la distribution de la P3b serait majoritairement pariétale (Segalowitz & Davies, 2004; Stige et al., 2007; Thomas & Nelson, 1996). La P3b est une réponse s'exprimant dès le plus jeune âge mais qui continuerait progressivement son développement chez l'enfant et l'adolescent. Ceci suggère que la trajectoire développementale de la P3b pourrait particulièrement être affectée par le processus de myélinisation des connexions dendritiques s'effectuant progressivement au cours de l'enfance et jusqu'à l'âge adulte, ainsi que par la maturation structurelle des lobes frontaux et celle du système dopaminergique (Segalowitz, Santesso, Murphy, et al., 2010).



**Figure 36** : Trajectoires développementales, de l'enfance à l'âge adulte, de (a) la latence et de l'amplitude (b) de la P3b (ici dite P300) (Dinteren et al., 2014).

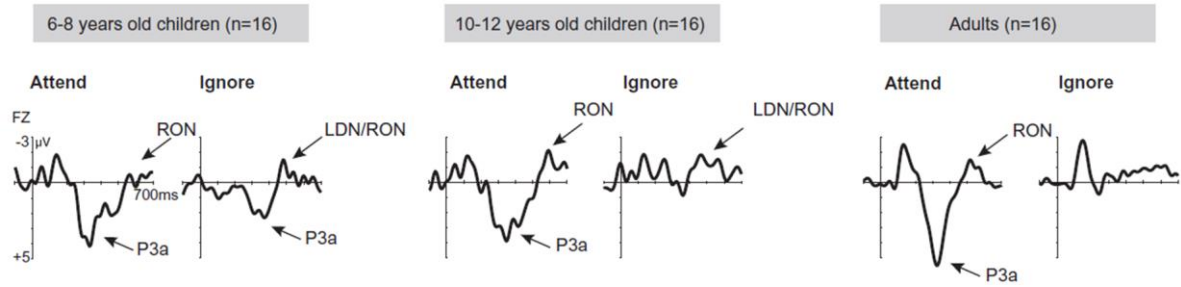
Le développement du complexe P3 en réponse à des stimuli pertinents a été étudié de manière extensive par le passé, mais il existe comparativement moins de travaux ayant exploré le développement des composantes précoces et tardives de la P3a en réponse à des sons distracteurs (Wetzel & Schröger, 2014). De plus, le manque de consensus concernant la nomenclature des réponses précoces et tardives de la P3a contribue à complexifier le travail de synthèses des différentes études développementales disponibles à ce jour. Dans l'ensemble, les résultats de ces études indiquent qu'une réponse cérébrale correspondant au complexe P3a chez l'adulte serait observable chez les nourrissons (Haden et al., 2009; Kushnerenko et al., 2002) et chez les enfants d'âge préscolaire (Putkinen et al., 2012; Shestakova et al., 2003). Cette réponse s'affinerait avec l'âge, et un complexe P3a comparable à celui de l'adulte serait finalement être observable à l'âge scolaire (Ceponiene et al., 2004; Courchesne, 1978; Cycowicz et al., 1997; Gumenyuk et al., 2001, 2004; Wetzel et al., 2006, 2011). La trajectoire développementale du complexe P3a reste cependant mal définie. Certaines études ont par exemple rapporté des différences de latence de la P3a chez l'enfant de 5 à 13 ans comparé à l'adulte (Courchesne, 1978; Cycowicz et al., 1996; Gumenyuk et al., 2001, 2004; Kihara et al., 2010), tandis que d'autres n'observent pas de différences développementales (Horváth et al., 2009; Ruhnau et al., 2010, 2013). Par ailleurs, l'amplitude de cette réponse chez l'enfant de 6 à 12 ans peut être modulée, de la même manière que chez l'adulte, par le degré de déviance des stimuli distracteurs (Wetzel et al., 2006) ; certains résultats issus de travaux dans la modalité visuelle indiquent que l'amplitude du complexe P3a augmenterait avec l'âge (Kihara et al., 2010).

Il existe très peu d'études ayant tenté de dissocier la trajectoire développementale de la P3a précoce de celle de la P3a-t. Certaines études rapportent toutefois que la distribution de la P3a au niveau du scalp évoluerait avec l'âge : plus importante au niveau frontal durant l'enfance, cette distribution serait plutôt centrée au niveau pariétal à partir de 10-12 ans (Brinkman & Stauder, 2008; Ceponiene et al., 2004; Määttä et al., 2005; Wetzel et al., 2011; Wetzel & Schröger, 2014). De la même manière, la P3a-t présenterait une distribution maximum au niveau fronto-central entre 5 et 7 ans, central entre 8 et 9 ans, puis centro-pariétal jusqu'à 12 ans et enfin au niveau pariétal chez l'adulte (Brinkman & Stauder, 2008; Wetzel & Schröger, 2007). Par ailleurs, il a également été suggéré que la latence de la P3a-t serait plus importante chez l'enfant de 5 à 12 ans comparé à une population adulte (Brinkman & Stauder, 2008; Wetzel & Schröger, 2014). Il a été suggéré

par le passé que la topographie postérieure de la P3a-t serait impliqué dans le processus de comparaison des informations sensorielles aux schémas environnementaux stockés en mémoire (Cywocicz & Friedman, 1998; Knight et al., 1995). Ce processus d'évaluation sensorielle pourrait être encore immature à 12 ans et pourrait contribuer à biaiser l'évaluation attentionnelle des informations non pertinentes se présentant dans l'environnement : l'immaturité de cette fonction pourrait donc contribuer à expliquer la présence d'effets comportementaux de distraction accentués durant l'enfance.

### ***La réponse RON***

La capacité à réorienter l'attention vers un stimulus pertinent suite à son orientation involontaire vers un distracteur est indexée par la RON. L'étude de la RON implique l'utilisation d'un paradigme actif où le participant doit répondre à une cible tout en ignorant des distracteurs la précédant. Cette nécessité complique intrinsèquement l'étude de la RON chez l'enfant qui tend à se fatiguer rapidement lors des tâches actives proposées en laboratoire ; jusqu'ici, peu d'études ont donc tenté de caractériser le développement de la RON de l'enfance à l'âge adulte (Wetzel & Schröger, 2014). Les rares résultats disponibles indiquent qu'une réponse négative partiellement similaire à la RON a été observée chez l'enfant de 5 à 6 ans (Mikkola et al., 2010; Wetzel et al., 2004). Cette réponse évoluerait de 6 à 9 ans pour prendre une forme identique à la RON observable chez l'adulte ; une réduction de sa latence chez l'enfant de 6 à 12 ans serait néanmoins observable et suggère que les mécanismes sous-jacents seraient immatures durant l'enfance (Horváth et al., 2009; Ruhnau et al., 2010; Wetzel et al., 2006) (voir Fig. 37). Si la RON en réponse à un distracteur s'amoinde lorsque ce dernier est précédé d'un indice informatif (Horváth et al., 2011; Sussman et al., 2003; Wetzel et al., 2006), cette réponse pourrait être un marqueur cérébral pertinent de la capacité de l'enfant à réorienter volontairement son attention sur une cible auditive pertinente après qu'un stimulus distracteur soit apparu dans l'environnement. Étudier le développement de la RON pourrait donc permettre de mieux comprendre l'origine cérébrale de la distractibilité accrue chez l'enfant.



**Figure 37** : Modulation du complexe P3a et de la RON de l'enfance à l'âge adulte. Les valeurs utilisées dans les graphiques correspondent au contraste des réponses en conditions standard et déviant. Dans la condition son attendu (attend) le participant doit discriminer la durée d'un son cible précédé de son standard ou déviant, tandis que dans la condition son à ignorer (ignored) le participant regarde passivement une vidéo silencieuse pendant que son diffusés les différents types de sons. L'amplitude du complexe P3a et de la RON augmentent de l'enfance à l'âge adulte (6-8 ans partie gauche, 10-12 ans partie médiane, adultes partie droite) (Wetzel & Schröger, 2014).

## 2.4. Conclusion du chapitre

De l'âge préscolaire à l'âge adulte, le cerveau connaît de nombreux changements structurels et fonctionnels associés à une amélioration des performances attentionnelles. D'un point de vue comportemental, la distractibilité accrue chez l'enfant résulterait principalement de capacités attentionnelles volontaires (orientation attentionnelle et attention soutenue) plus faibles que chez l'adulte, tandis que les résultats concernant l'attention involontaire sont moins robustes et ne permettent pas de caractériser l'impact comportemental d'un son distracteur (i.e. effet de distraction et d'alerte phasique) sur la réalisation d'une tâche. Durant l'enfance, la propension à agir impulsivement régresse significativement. Au niveau cérébral, les réponses auditives comme la P50, la réponse N1 et N2-P2, et d'autres réponses attentionnelles telles que la CNV, le complexe P3 et la RON, pourraient être des marqueurs pertinents pour explorer le développement de la distractibilité durant l'enfance. Ces réponses ont particulièrement été étudiées lors de tâches d'écoute dichotique, de Posner ou encore de tâches de type Oddball. En ce sens, le comportement de ces réponses cérébral a très rarement été étudié lorsque l'attention volontaire et involontaire entre en interaction (i.e. condition sine qua non de la mesure précise de la distractibilité). Chez l'adulte, quelques études s'appuyant sur l'utilisation du test CAT indiquent que l'effet d'interaction de l'attention volontaire et involontaire conditionne ensemble le traitement de l'information auditive non pertinente. De plus, les résultats de ces études indiquent que le traitement d'un distracteur auditif impacterait les mécanismes de détection des stimuli auditifs à un niveau précoce. Le développement de ces différents effets cérébraux n'a pas encore été étudié durant l'enfance. En cela, l'administration du test CAT à des populations d'âges différents pourrait permettre de finement caractériser le développement comportemental et cérébral de la distractibilité. La mise en lumière des corrélats comportementaux et cérébraux de la distractibilité constituerait une avancée majeure dans le domaine des neurosciences cognitives fondamentales mais également dans celui de la santé publique. En effet, le manque de standards concernant l'efficacité des composantes attentionnelles de la distractibilité chez l'enfant neuro-typique impacte la pratique clinique lorsqu'il s'agit de diagnostiquer la présence un déficit attentionnel : comment définir le pathologique quand la norme est elle-même mal définie ?

## Chapitre 3. Vers une mesure standardisée de la distractibilité

### 3.1. La distractibilité : du normal au pathologique

#### *i. Le trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité*

L'attention constitue un prérequis aux apprentissages. Dès l'âge de 4 ans, 40% des enfants présenteraient des difficultés attentionnelles observables au sein du milieu familial et scolaire (Palfrey et al., 1985). Chez l'enfant, les manifestations comportementales de l'inattention (i.e. la tendance à ne pas assez prêter attention aux stimuli les plus pertinents de l'environnement) serait observables chez 3 à 15% de la population générale sans pour autant s'avérer cliniquement significatives (Mortweet & Christophersen, 2003). Si la distractibilité accrue pourrait contribuer à la tendance naturelle de l'enfant à se montrer inattentif. Cependant, l'inattention et la distractibilité peuvent également refléter un développement atypique des fonctions attentionnelles.

Le trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA-H) est un trouble neuro-développemental au tableau clinique variable. Ce trouble entraîne une altération cliniquement significative du fonctionnement social, scolaire et de la qualité de vie. Il existe deux catégories de manifestations symptomatiques du TDA-H : l'inattention et l'hyperactivité/impulsivité. Avec la parution du DSM-V, la description clinique de ces deux catégories de symptômes du TDA-H a été affinée (voir Tab. 1). Les principales manifestations de la forme inattentive du trouble se reflètent au travers de difficultés purement attentionnelles qui entraînent le plus souvent, et de manière non exhaustive, un comportement distrait, laissant penser que l'individu ne semble pas écouter ce qu'on lui dit ; il ne parvient pas à maintenir longtemps le contact visuel et présente un déficit de maintien de l'attention dans le temps ; il a ainsi tendance à faire de nombreuses digressions dans son discours, et peine à se concentrer volontairement sur une tâche notamment lorsque celle-ci est ennuyeuse. La forme hyperactive/impulsive entraîne pour sa part des symptômes moins discrets qui se traduisent par une incapacité à se tenir tranquille lors de situations professionnelles ou scolaires pour lesquelles il est normalement nécessaire de rester assis, ou lors de jeux ou d'activités ; l'individu souffrant de TDA-H ressentira le plus souvent une impatience motrice et aura tendance à s'agiter, courir ou grimper alors que le contexte ne s'y prête pas ; de plus, on retrouvera souvent une tendance à parler très souvent, à couper la parole et à interrompre les conversations



en cours. La forme mixte du trouble possède un tableau clinique regroupant des symptômes de forme inattentive et hyperactive/impulsive. Dans tous les cas, ce trouble est connu pour son incidence et pour l'impact de ses répercussions fonctionnelles sur le quotidien, ceci tant sur le plan scolaire, professionnel que social.

**Tableau 1** : Critères diagnostic du TDA-H Selon la cinquième version du DSM (Diagnostic and statistical manual of mental disorders), de l'American Psychiatric Association (APA, 2013)

*Pour chacune des catégories, 6 (ou plus) des symptômes suivants ont persisté pendant au moins 6 mois, à un degré qui ne correspond pas au niveau de développement et qui a directement des conséquences négatives sur les activités sociales et académiques/professionnelles (Remarque : les symptômes ne sont pas seulement la manifestation d'un comportement d'opposition, d'une déficience, d'une hostilité ou de l'incompréhension de tâches ou d'instructions. Pour les grands adolescents et les adultes (âgés de 17 ans et plus), au moins 5 symptômes sont exigés) :*

| <b>Inattention</b>               |  |
|----------------------------------|--|
| 1                                | Souvent ne parvient pas à prêter attention aux détails ou fait des fautes d'étourderie dans les devoirs scolaires, le travail ou d'autres activités (ex : néglige ou oublie des détails, le travail n'est pas précis)  |
| 2                                | A souvent du mal à soutenir son attention au travail ou dans les jeux (ex : a du mal à rester concentré durant un cours, une conversation, la lecture d'un texte long) ;   |
| 3                                | Semble souvent ne pas écouter quand on lui parle personnellement (ex : leur esprit paraît ailleurs, même en l'absence d'une distraction manifeste)   |
| 4                                | Souvent, ne se conforme pas aux consignes et ne parvient pas à mener à terme ses devoirs scolaires, ses tâches domestiques ou ses obligations professionnelles (ex : commence le travail mais perd vite le fil et est facilement distrait)   |
| 5                                | A souvent du mal à organiser ses travaux ou ses activités (ex : difficultés à gérer des tâches séquentielles ; difficultés à conserver ses outils et ses affaires personnelles en ordre ; complique et désorganise le travail ; gère mal le temps ; ne respecte pas les délais fixés)  |
| 6                                | Souvent évite, a en aversion ou fait à contre-cœur les tâches qui nécessitent un effort mental soutenu (ex : le travail scolaire ou les devoirs à la maison ; pour les adolescents et les adultes, préparation de rapports, formulaires à remplir, revoir un long article)   |
| 7                                | Perd souvent les objets nécessaires à son travail ou à ses activités (matériel scolaire, crayons, livres, outils, portefeuille, clés, papiers, lunettes, téléphone mobile)   |
| 8                                | Souvent se laisse facilement distraire par des stimuli externes (pour les adolescents et les adultes, cela peut inclure passer du « coq à l'âne »)   |
| 9                                | A des oublis fréquents dans la vie quotidienne (ex : faire les corvées, les courses ; pour les adolescents et les adultes, répondre à ses appels, payer ses factures, respecter ses rendez-vous).  |
| <b>Impulsivité/Hyperactivité</b> |  |
| 1                                | Remue souvent les mains ou les pieds ou se tortille sur son siège  |
| 2                                | Se lève souvent en classe ou dans d'autres situations où il est supposé rester assis (ex : se lève de sa place en classe, au bureau ou à son travail, ou dans d'autres situation qui nécessitent de rester assis)  |
| 3                                | Souvent, court ou grimpe partout, dans les situations où cela est inapproprié (remarque : chez les adolescents ou les adultes, cela peut se limiter à un sentiment d'agitation)  |
| 4                                | A souvent du mal à se tenir tranquille dans les jeux ou les activités de loisir  |
| 5                                | Est souvent "sur la brèche" ou agit souvent comme s'il était "monté sur ressorts" (ex : incapable ou inconfortable de se tenir immobile pendant un long moment, comme dans les restaurants, les réunions ; peut être perçu par les autres comme agité ou comme difficile à suivre)   |
| 6                                | Souvent, parle trop  |
| 7                                | Laisse souvent échapper la réponse à une question qui n'est pas encore entièrement posée (ex : termine la phrase de leur interlocuteurs ; ne peut attendre son tour dans une conversation)   |
| 8                                | A souvent du mal à attendre son tour (ex : lorsque l'on fait la queue)   |
| 9                                | Interrompt souvent les autres ou impose sa présence (ex : fait irruption dans les conversations, les jeux ou les activités ; peut commencer à utiliser les biens d'autrui sans demander ou recevoir leur autorisation ; pour les adolescents et les adultes, peut s'immiscer ou s'imposer et reprendre ce que d'autres font) |

Les études épidémiologiques suggèrent que, selon les critères du DSM-V (2013), il y aurait une prédominance du type mixte (80%), les types inattention (15%) et

hyperactivité/impulsivité (5%) s'avérant moins représentés (Polanczyk et al., 2007; G. V. Polanczyk et al., 2015). La précocité du diagnostic est un enjeu crucial de santé publique car une absence de prise en charge entraîne chez l'enfant et l'adolescent une baisse de l'estime de soi, un échec scolaire, ainsi que des difficultés dans le domaine social et familial (Harpin, 2005). La Haute Autorité de Santé indique qu'en France 3 à 5% des enfants d'âge scolaire souffriraient d'un TDA-H : ce chiffre est en constante augmentation avec la compréhension des causes du trouble et la formation des médecins à son identification. Grâce au phénomène de maturation cérébrale, la prévalence du trouble diminue naturellement au cours du développement. Cependant, de l'enfance à l'adolescence, la diminution des symptômes du TDA-H s'accompagne d'une augmentation des exigences scolaires et sociales, qui induit un maintien dans le temps des symptômes et de leur impact au quotidien. Ainsi, le trouble persiste dans 65% des cas à l'âge adulte (Faraone et al., 2006). Sur le long terme, ces déficits peuvent contribuer à un échec professionnel et une désinsertion sociale ; le coût sociétal de ce trouble est donc important. L'étiologie du TDA-H est quant à elle complexe et encore imprécise à ce jour. On suppose cependant qu'elle pourrait être génétique, environnementale, ou résulterait de l'interaction de ces deux types de facteurs.

Au niveau cérébral, le trouble de l'attention chez l'enfant serait associé à un dysfonctionnement des processus de maturation du réseau fronto-striatal qui comprend le cortex préfrontal latéral, le cortex cingulaire antérieur dorsal, le noyau caudé et le putamen (Curatolo et al., 2010; Purper-Ouakil et al., 2011). Une altération morphologique ou fonctionnelle de ces structures cérébrales, qu'elle soit d'origine développementale ou acquise, est connue pour entraîner des difficultés de facilitation ou d'inhibition les traitements des stimuli se présentant dans l'environnement interne ou externe. Les individus souffrant de TDA-H présentent également un dysfonctionnement du système dopaminergique (Blum et al., 2008) ; la dopamine est un neurotransmetteur impliqué dans la mécanique biologique qui sous-tend notamment le déploiement de l'attention dans sa dimension volontaire. Par ailleurs, un dysfonctionnement du système noradrénergique a également été identifié comme facteur contribuant aux déficits relatifs au système attentionnel d'alerte dans le TDA-H (Jamkhande & Khawaja, 2016; Ulke et al., 2019). Le TDA-H pourrait donc être lié à des déficits spécifiques de transmission catécholaminergique.

Les traitements médicamenteux prescrits pour pallier les symptômes qu'entraîne le TDA-H peuvent être mis en place vers l'âge de 6 ans. Ces traitements appartiennent à

deux catégories distinctes : les psychostimulants et les non-psychostimulants. En France, la majorité des psychostimulants utilisés contiennent une molécule active, le méthylphénidate, qui permet de réduire la recapture de la dopamine dans la fente synaptique et stimule sa libération au niveau du neurone en amont ; ce procédé contribuerait à la diminution des symptômes du TDA-H. Les non-psychostimulants sont basés sur l'action de l'atomoxétine, un inhibiteur sélectif de la recapture de la noradrénaline ; cette molécule est disponible dans certains pays européens ou aux Etats Unis, mais a été retirée de la vente en 2012 en France, notamment à cause de ses possibles effets secondaires (psychiatriques, hépatiques et cérébrovasculaires). La thérapie est généralement instaurée les jours où l'enfant va à l'école, mais elle doit être au maximum arrêtée durant les activités extra-scolaires et les temps libres. Les effets secondaires des psychostimulants sur le long terme sont encore mal définis et il est important de garder à l'esprit que ce type de traitement permet, certes, d'annuler provisoirement la cause des symptômes, mais pas de soigner définitivement le trouble. Pour cette raison, l'association d'une thérapie psychologique à la prise de psychostimulants est conseillée pour que l'efficacité de la prise en charge soit optimale pour le patient.

## *ii. La distractibilité dans sa dimension pathologique*

D'un point de vue général, les individus souffrant de TDA-H présentent des déficits cognitifs restreints à la sphère des fonctions exécutives, de l'attention et de la mémoire de travail, ainsi que des difficultés marquées au niveau du processus de résolution de conflits cognitifs (Bush et al., 1999; Casey et al., 1997; Nigg et al., 1997; Novak et al., 1995; Oberlin et al., 2005; Pliszka et al., 2006; Rubia et al., 2005; Schulz et al., 2014; Ulke et al., 2019; Vaidya et al., 2005; Van der Meere & Sergeant, 1988). Au niveau attentionnel, les enfants avec TDA-H présentent typiquement des TR plus lents et plus variables que des enfants neuro-typiques dans des tâches de détection de cibles avec amorçage (Nigg et al., 1997; Novak et al., 1995; Van der Meere & Sergeant, 1988). En revanche, ces deux types de population présentent, de manière similaire, un ralentissement de la réponse aux stimuli cibles lorsque ces derniers sont précédés par des sons distracteurs (Huang & Elhilali, 2017; Nigg et al., 1997; Novak et al., 1995; Oberlin et al., 2005; Van der Meere & Sergeant, 1988) ; par contraste, d'autres résultats laissent penser que les enfants TDA-H se laisseraient plus facilement distraire par les stimuli non pertinents que les enfants au développement typique seulement lorsque la tâche réalisée constitue une faible charge

cognitive (Friedman-Hill et al., 2010). Bien que la distractibilité accrue constitue une des plaintes les plus fréquemment évoquées par les patients et leur famille concernant le retentissement du TDA-H au quotidien, les manifestations comportementales précises de ce symptôme seraient variées et toujours mal définies. Ces variations de performances comportementales dans des tâches attentionnelles ont poussé plusieurs auteurs à s'interroger sur l'origine de la distractibilité accrue dans le TDA-H : les symptômes de ce trouble pourraient en effet résulter d'un déficit touchant plutôt les systèmes d'orientation de l'attention et de l'alerte, ou plutôt d'un déficit exécutif impliquant un dysfonctionnement de mécanismes inhibiteurs (Barkley, 1997; Friedman-Hill et al., 2010; Huang-Pollock et al., 2005). Les symptômes du trouble pourraient donc se manifester sous la forme d'une difficulté à orienter l'attention vers des cibles pertinentes pour les anticiper de manière appropriée, d'une capture attentionnelle trop importante, ou encore d'un effet d'alerte phasique trop ou peu important.

La littérature recense également, chez l'enfant TDA-H, plusieurs différences concernant certaines réponses cérébrales évoquées lors de tâches attentionnelles. La variabilité des TR importante que présentent les enfant TDA-H au niveau comportemental a notamment été associée à une réduction de l'amplitude de la CNV (Albrecht et al., 2013; Banaschewski et al., 2008; Kratz et al., 2012; van Leeuwen et al., 1998). Par ailleurs, une réduction de l'amplitude de la réponse P3b a été observée chez l'adulte (McLoughlin et al., 2011; Szuromi et al., 2011) et chez l'enfant TDA-H (Brandeis et al., 2002; Kratz et al., 2011; Schochat et al., 2002; Tsai et al., 2012) en comparaison à des populations contrôles. Ce phénomène de réduction de l'amplitude de la CNV et de la P3b chez l'enfant TDA-H se normalise respectivement après traitement par atomoxetine (Kratz et al., 2012) et méthyphénidate (Dolu et al., 2019; Kratz et al., 2012). Par ailleurs, la P3b en réponse à une information pertinente serait réduite chez l'enfant TDA-H (Janssen et al., 2016; Satterfield et al., 1994). De plus, les traitements par métylphénidate et atomoxétine affecteraient de manière différenciée la distribution de scalp de la P3b (Sangal & Sangal, 2006). Si les réponses cérébrales associées au contrôle volontaire de l'attention ont été étudiées de manière extensive durant les dernières décennies, il existe en revanche peu de travaux ayant tenté d'identifier les différences de fonctionnement cérébral liées au déploiement involontaire de l'attention chez l'enfant TDA-H et chez l'enfant neuro-typique. Concernant le complexe P3a, certaines études indiquent qu'il n'existerait pas de différence concernant la P3a-t en réponse à des stimuli nouveaux chez l'enfant TDAH-H comparé aux enfants neuro-typiques (Jonkman et al., 1997; Kemner et al., 1996). Certaines études rapportent également une réduction de l'amplitude de la composante de la P3a-p en

réponse à des sons distracteurs chez l'enfant TDA-H (Gumenyuk et al., 2005), tandis que d'autres travaux observent des résultats inverses (van Mourik et al., 2007). Pris dans leur ensemble, ces résultats suggèrent que les mécanismes de préparation attentionnelle et motrice, d'orientation attentionnelle et d'allocation de ressources au traitement des stimuli pertinents seraient dysfonctionnel chez l'individu présentant un TDA-H.

La distractibilité accrue est pourtant un symptôme presque systématiquement observable chez l'enfant TDA-H mais peu documenté dans la littérature (van Mourik et al., 2007). La distractibilité peut être conceptualisée comme relevant d'un continuum. Un état normal de distractibilité permet de se concentrer sur une tâche particulière sans pour autant négliger l'environnement avoisinant. L'hypo-distractibilité, à l'extrême de ce continuum, renvoie à un état de concentration imperturbable : l'individu est capable de se concentrer sur une tâche mais est en outre incapable de se montrer réactif à l'environnement qui l'entoure. L'extrême opposé du continuum renvoie pour sa part à l'hyper-distractibilité : la distractibilité est ici tant accrue qu'il n'est plus possible pour l'individu de se concentrer, son attention est involontairement capturée par les stimuli non pertinents qui se présentent dans son environnement et la réorientation volontaire de l'attention vers les stimuli pertinents n'est pas toujours possible. La distractibilité accrue, dans sa dimension pathologique, constitue une plainte centrale chez les patients souffrant de TDA-H. Dans le domaine de la recherche fondamentale, les manifestations comportementales de cette distractibilité exacerbée restent mal définies et les dysfonctionnements cérébraux les sous-tendant ont, à ce jour, seulement été partiellement identifiés. Il n'est donc pas surprenant de constater qu'il n'existe que très peu d'index comportementaux et cérébraux permettant de comparer cliniquement les individus TDA-H à une population contrôle. Des travaux utilisant le paradigme CAT montrent néanmoins que la distractibilité accrue au cours du vieillissement normal résulterait du déclin de mécanismes attentionnels volontaires impliqués dans l'inhibition de l'information sensorielle non pertinente (ElShafei, Fornoni, et al., 2018). Si le CAT permet de caractériser les changements de distractibilité liés à l'âge, ce test pourrait également s'avérer pertinent pour détecter les altérations pathologiques de l'attention.

## 3.2. Quelles mesures disponibles ?

### *i. Tests psychométriques disponibles pour l'aide au diagnostic du TDA-H*

Les signes d'alerte du TDA-H se manifestent en premier recours par des difficultés exprimées par l'enfant, sa famille ou son entourage scolaire ; ces difficultés concernent à la fois le domaine scolaire et extrascolaire. Le trouble est initialement suspecté par le médecin généraliste qui doit ensuite adresser le patient à un médecin spécialiste du trouble. Le diagnostic de TDA-H repose sur des critères cliniques spécifiques défini dans le DSM-V (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, 2013). Pour que le diagnostic de TDA-H soit avéré, on doit retrouver chez l'individu la manifestation d'au moins 5 points sur 9 des symptômes décrits dans le DSM-V pour les dimensions d'inattention et/ou d'hyperactivité/impulsivité. L'évaluation neuropsychologique dans le cadre du TDA-H utilise généralement à minima un questionnaire basé sur les critères du DSM-V pour identifier la présence de symptômes et leur nature, mais s'appuie particulièrement sur les résultats de tests psychométriques standardisés pour comparer les performances comportementales du patient à celles d'une population considérée comme normale.

Les premiers tests psychométriques en France ont vu le jour au début du 20ème siècle grâce à Alfred Binet et sa première échelle visant à mesurer l'intelligence. En parallèle à l'avancée de la recherche en psychologie cognitive, de nombreux modèles théoriques du fonctionnement de la cognition ont été – et sont encore actuellement – développés et améliorés. Ces modèles ont influencé la neuropsychologie via le développement de tests cognitifs et de stratégies interprétatives fondées sur la compréhension conceptuelle des modèles cognitifs (Lezak, 1995). Ainsi, une meilleure connaissance fondamentale du fonctionnement cognitif normal a fortement contribué à l'élaboration des tests cliniques. Un test psychométrique peut être défini comme suit : « on appelle un test mental une situation expérimentale standardisée servant de stimulus à un comportement. Ce comportement est évalué par une comparaison statistique avec celui d'autres individus placés dans la même situation, permettant ainsi de classer le sujet examiné, soit quantitativement, soit typologiquement » (Delay & Pichot, 1949). Les batteries de tests et les tests spécifiques doivent être choisis pour répondre le plus précisément aux questions relatives au diagnostic clinique d'un trouble cognitif.

Les résultats aux tests neuropsychologiques sont des mesures comportementales (e.g. TR, pourcentage). Ces mesures en elles-mêmes n'ont pas de signification et doivent être

comparées à une référence (i.e. valeur standardisée) permettant de situer la mesure individuelle du patient par rapport à cette référence. Pour ce faire, les mesures brutes sont transformées en rangs centiles (e.g. centiles aussi dit « percentiles ») et en paramètres normalisés (e.g. score Z ou T) dans le but de permettre d'une part la comparaison avec la population de référence, mais aussi la comparaison avec d'autres scores obtenus lors de différents tests. La notion de norme statistique qui sous-tend la norme de variabilité caractérise une certaine variation autour de la moyenne. Il n'existe toutefois pas de consensus universel concernant les valeurs qui limitent l'étendue de cette variation autour de la moyenne. En février 2018, un rapport de l'association Suisse des Neuropsychologues indique que la limite standard de la norme correspond en général au percentile 5 en Suisse, en France et en Italie tandis que dans les pays germano- et anglophones, la limite de la norme se situerait au percentile 16, soit un écart-type en dessous de la moyenne de la population générale. Les critères définissant les limites du pathologiques sont variables au sein même de l'Europe. Par ailleurs, certains facteurs comme le niveau socio-économique ont une influence avérée sur le fonctionnement cognitif : la neuroplasticité liée au milieu socio-économique serait notamment mise en jeu pour une meilleure adaptation au milieu. Au sein même d'un échantillon de population considéré comme normal, les performances attentionnelles peuvent par exemple varier en fonction de l'environnement quotidien dans lequel évoluent les individus, et plus particulièrement les enfants (Clearfield & Jedd, 2013; D'Angiulli et al., 2008; Hampton Wray et al., 2017; Kishiyama et al., 2009). Peu de tests sont néanmoins étalonnés en fonction de, ou en contrôlant rigoureusement, le niveau socio-économique des individus contribuant à la création de la base de données normative.

Dans le milieu clinique, les batteries de tests les plus couramment utilisés pour diagnostiquer le TDA-H sont des examens particulièrement chronophages, notamment au regard du temps typiquement alloué aux consultations dans le secteur médical publique. Dans sa routine hospitalière, le praticien dispose en effet rarement de plus d'une ou deux heures pour réaliser le bilan neuropsychologique du patient qu'il reçoit. Certaines batteries de tests comme la KiTAP (*Psytest - KiTAP*, n.d.) ou la TEA-CH (*TEA-CH - Test d'Évaluation de l'Attention chez l'enfant*, n.d.) proposent des épreuves permettant de caractériser le fonctionnement de différentes facettes attentionnelles tant dans la modalité auditive que visuelle ; leur temps total de réalisation est cependant estimé à une heure minimum. Ceci entraîne intrinsèquement deux limites pour le praticien : d'une part il n'aura généralement pas le temps d'explorer l'efficacité de chaque facette attentionnelle que le test propose d'évaluer et devra donc se baser sur les données de l'anamnèse pour cibler

le plus efficacement possible l'évaluation de processus lui paraissant déficitaires ou préservés ; d'autre part, la réalisation des différents tests épuise particulièrement l'enfant TDA-H et peut, lorsque l'évaluation est trop longue et réalisée sans pause, biaiser les résultats obtenus au test. Ce problème est central lorsqu'il s'agit de mesurer la distractibilité lors de consultation neuropsychologiques : si de nombreuses facettes attentionnelles contribuent à la distractibilité, comment mesurer l'efficacité de toutes ces composantes si le temps imparti pour l'évaluation et la fatigabilité de l'enfant ne permettent pas la réalisation de nombreux tests successifs ?

## *ii. Perspectives pour le développement d'un nouvel outil de dépistage des altérations pathologiques de la distractibilité*

Le test CAT (Bidet-Caulet et al., 2015) permet de mesurer simultanément l'efficacité de différentes composantes attentionnelles impliquées dans la distractibilité. La simplicité de cette tâche a pour avantage de permettre tant à des enfants en bas âge qu'à des adultes de le réaliser (voir section I, p. 29). Différentes études ont par ailleurs montré la pertinence des mesures fournies par le CAT pour évaluer la distractibilité, ce tant dans une approche comportementale que neurophysiologique (Bidet-Caulet et al., 2015; Elshafei et al., 2020; ElShafei, Bouet, et al., 2018; ElShafei et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019).

Dans une approche comportementale, la durée de passation de ce test est estimée à 20min. Si ce temps de réalisation peut à première vue sembler assez important, il convient de préciser que 20min de test fournirait ici 14 scores cognitifs. Chez le patient, ces scores permettent ensemble de mesurer un grand nombre de facettes attentionnelles impliquées dans la distractibilité. Les différentes composantes cognitives mesurées par le test CAT et d'autres tests attentionnels informatisés et à visée clinique actuellement disponibles sur le marché sont recensées, de manière non exhaustive, ci-après (voir Tab. 2 et 3).



**Tableau 2** : Table de comparaison des sphères cognitives évaluées par le test CAT et d'autres tests attentionnels fréquemment utilisés en clinique (liste non exhaustive)

| Nom de l'outil | Aspects cognitifs évalués        |                    |             |                 |                 |                 |           |                   |            |                    |                      |                      |
|----------------|----------------------------------|--------------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|-------------------|------------|--------------------|----------------------|----------------------|
|                | Attention sélective (volontaire) | Attention soutenue | Impulsivité | Alerte phasique | Distractibilité | Contrôle moteur | Vigilance | Attention divisée | Perception | Mémoire de travail | Fonctions exécutives | Coordination motrice |
| CAT            | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| KITAP          | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| TAP            | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| TAP-M          | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| TEA            | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| TEA-CH         | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| CPT            | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| TOVA           | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| STROOP         | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |
| CAB-ADHD       | x                                | x                  | x           | x               | x               | x               | x         | x                 | x          | x                  | x                    | x                    |

**Tableau 3** : Table de comparaison des modalités pratiques de l'évaluation neuropsychologique via l'utilisation du test CAT et d'autres tests attentionnels fréquemment utilisés en clinique (liste non exhaustive)

| Nom de l'outil | Utilisation du langage ou du calcul | Sollicitation des fonctions exécutives pour la réponse | Versions parallèles pour test/retest | Temps (batterie complète) |
|----------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------|
| CAT            | non                                 | non  | oui                                  | ~ 20min                   |
| KITAP          | non                                 | oui  | non                                  | ~ 1h30                    |
| TAP            | non                                 | oui  | non                                  | ~ 2h30                    |
| TAP-M          | non                                 | oui  | non                                  | ~ 1h30                    |
| TEA            | oui                                 | oui  | oui                                  | ~ 1h                      |
| TEA-CH         | non                                 | oui  | oui                                  | ~ 1h                      |
| CPT            | non                                 | oui  | oui                                  | ~ 20min                   |
| TOVA           | non                                 | oui  | non                                  | ~ 20min                   |
| STROOP         | oui                                 | oui  | oui                                  | ~ 5 min                   |
| CAB-ADHD       | non                                 | oui  | non                                  | ~ 30-40 min               |

De par sa rapidité d'administration et le nombre important de composantes cognitives qu'il évalue, le test CAT pourrait pour sûr présenter des avantages pratiques pour une utilisation clinique. Les différents types de scores pouvant être calculés grâce à l'utilisation du test CAT et les questions cliniques motivant leur calcul sont listés au sein du tableau présenté ci-dessous (voir Tab. 4).

**Tableau 4** : Listes des mesures fournies par le test CAT.

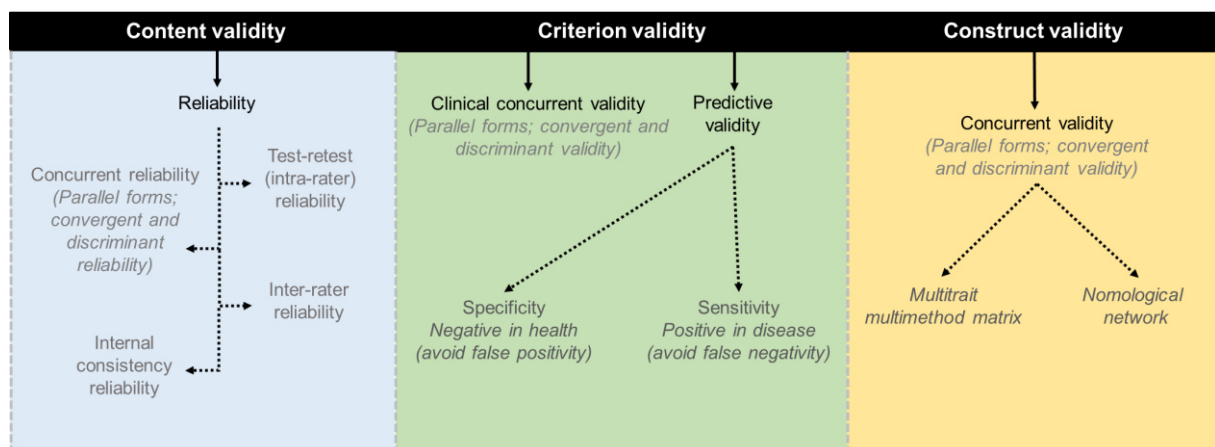
| Mesures fournies par le test CAT         | Questions cliniques auxquelles répondent les mesures   | Intérêt général                          |
|--|--|--|
| <b>Indice perf générale (OK)</b>         | Le patient réussit-il la tâche ?   | Mesures des performances générales       |
| <b>VTT (RT)</b>                          | A quelle vitesse le patient traite-t-il l'information ?  |  |
| <b>CTRL moteur (RandRep)</b>             | Le patient a-t-il tendance à répondre sans raison ? Si oui, attention à l'interprétation des résultats ?   |  |
| <b>Impulsivité réactive (CueRep)</b>     | Le patient est-il impulsif lorsqu'il perçoit des informations pertinentes ?                                | Mesures de l'impulsivité / Hyperactivité |
| <b>Impulsivité proactive (AntRep)</b>    | Le patient est-il impulsif lorsqu'il s'attend à la survenue d'informations pertinentes ?                   |  |
| <b>Impulsivité réactive (DisRep)</b>     | Le patient est-il impulsif lorsqu'il perçoit des informations distrayantes ?                               |  |
| <b>Alerte phasique (RT)</b>              | Le patient est-il alerte aux informations saillantes et non pertinentes présentes dans son environnement ? | Mesures de l'inattention                 |
| <b>Distraction (RT)</b>                  | Quel est l'impact de la distraction sur la vitesse de traitement chez le patient                           |  |
| <b>Distraction (LateRep)</b>             | Le patient est-il ralenti par les distractions ?   |  |
| <b>Distraction (MissRep)</b>             | Le patient manque-t-il des informations à cause des distractions ?   |  |
| <b>Orientation volontaire (RT)</b>       | Le patient utilise-t-il les informations pertinentes pour améliorer son efficacité ?                       |  |
| <b>Décrochage attentionnel (LateRep)</b> | Le patient est-il ralenti par des décrochages attentionnels ?  |  |
| <b>Décrochage attentionnel (MissRep)</b> | Le patient peut-il maintenir l'efficacité de son focus attentionnel dans le temps ?                        |  |
| <b>Attention soutenue (SD RT)</b>        | Le patient peut-il maintenir la qualité de son focus attentionnel dans le temps ?                          |  |

Les différentes mesures fournies par le test CAT pourraient être pertinentes pour la détection du TDA-H. Plus particulièrement, ce test propose différents indices reflétant l'efficacité de l'attention volontaire et involontaire, de l'alerte phasique et du contrôle moteur, ainsi que des indices reflétant l'impulsivité. Ces différents indices comportementaux pourraient être sélectivement modulés selon la forme du TDA-H (i.e. inattentive, hyperactive/impulsive ou mixte).

Si le test CAT pourrait s'avérer être un test pertinent et ergonomique pour l'aide au diagnostic du TDA-H, son transfert du domaine de la recherche au domaine de la clinique reste toutefois à réaliser. L'utilisation d'un test en clinique implique nécessairement la création d'une base de données normatives permettant la comparaison des mesures obtenues auprès du patient à celles obtenues chez une population neuro-typique. Sachant que les capacités attentionnelles changent rapidement au cours de l'enfance, les données normatives du test doivent être collectées chez des enfants de classe d'âge restreintes (e.g. 1 ans) pour permettre au test d'être sensible quel que soit l'âge du patient. Parallèlement, la procédure permettant l'utilisation clinique d'un test consiste à s'assurer que différents critères liés à cet outil sont bien remplis : cette procédure dite de validation permet d'établir la pertinence, la justesse et la robustesse des mesures que d'un test psychométrique (Pawlowski et al., 2013).

### 3.3. Précis de méthodologie pour la validation d'un nouvel outil clinique

Un test psychométrique fournit une mesure qui peut être transformée en score, permettant ainsi son interprétation clinique. Il est possible d'identifier trois catégories de procédures visant à assurer la pertinence et la fiabilité des mesures d'un test diagnostic. La validité de contenu vise à assurer la fiabilité de la mesure du test, la validité de critère consiste à prouver que les scores au test sont pertinents pour détecter les symptômes d'un trouble chez un individu et, enfin, la validité de construit étaye la robustesse des fondations théoriques sous-jacentes à la construction du test. Cependant, il n'existe pas de procédure standardisée permettant de déterminer si un test est valide ou non pour une utilisation clinique. Le précis méthodologique qui suit est le fruit de la synthèse d'études ayant décrit différentes méthodes pour établir la validité d'outils psychométriques ; du fait qu'il n'existe pas de procédure standard de validation de test, la liste suivante (voir Fig. 38 pour un résumé) doit être considérée comme non exhaustive.



**Figure 38 :** Représentation des principales méthodes utilisées pour la validation d'outils neuropsychologiques (liste non exhaustive). La validité de contenu (partie gauche) permet de s'assurer de la fiabilité des mesures du test ; la validité de critère (partie médiane) permet de s'assurer que les scores fournis par le tests sont bien pertinents pour une utilisation clinique, enfin la validation de construit (partie droite) permet de s'assurer que le test fourni bien une mesure des processus cognitifs qu'il doit en théorie mesurer. Les différentes méthodes relatives à chaque type de validité sont succinctement détaillées ci-après. NB : la méthode de fiabilité/validité concurrente peut être utilisée pour établir à la fois la validité de contenu, de critère et de construit.

### *i. La validité de contenu*

La validité de contenu renvoie à la capacité que possède un outil neuropsychologique à mesurer de manière consistante les fonctions ou processus qu'il prétend mesurer. Parmi les différentes méthodes permettant de valider cet aspect psychométrique, quatre s'avèrent majoritairement utilisées.

La première consiste à établir la fiabilité des mesures du test en utilisant une technique de test-retest. Cette mesure de fiabilité est obtenue par l'administration successive, mais espacée dans le temps, du test à un même groupe d'individus. Les scores obtenus lors de la première et seconde session de test peuvent être corrélés pour évaluer la stabilité des mesures à travers le temps.

La seconde est dite de fiabilité concurrente ou par formes parallèles et renvoie au concept de cohérence externe. Cette méthode consiste à administrer, en plus du test à valider, d'autres tests permettant de mesurer des aspects cognitifs similaires ou dissimilaires. La fiabilité convergente consiste à montrer que les mesures du test sont cohérentes avec celles fournies par d'autres tests considérés comme valides et qui mesurent les mêmes aspects cognitifs que le test à valider. La fiabilité discriminante (ou divergente) consiste à montrer que les mesures du test sont bien spécifiques à un construit particulier via la mise en exergue de l'absence de lien entre les mesures du test et celles d'autres tests évaluant des domaines cognitifs théoriquement indépendants. Cette comparaison implique le plus souvent la comparaison des mesures du test à d'autres mesures évaluant des domaines spécifiques ou généraux de la cognition : les mesures de fonctions ou processus fournies par le test doivent donc corrélérer avec celles d'autres outils évaluant les mêmes aspects spécifiques de la cognition, mais ne doivent pas être corrélées à des indices évaluant des domaines plus généraux de la cognition (e.g. pour la validation d'un test attentionnel, corrélation avec des indices issus de la KiTAP, TEA-CH ou du CPT (Conners' Continuous Performance Test 3rd Edition (Conners CPT 3) | Pearson Assessment, n.d.), mais absence de corrélation avec l'indice de raisonnement fluide ou verbal de la WISC (WISC-V - Échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents - 5ème édition, n.d.) ou de la WAIS (WAIS-IV - Échelle d'intelligence de Wechsler pour adultes - 4ème édition, n.d.)).

La troisième méthode permettant d'établir la validité de contenu consiste à montrer la fiabilité inter-évaluateurs des mesures (aussi dite « inter-rater » ou « inter-juges »). La fiabilité inter-évaluateurs peut être calculée par la comparaison de la mesure du même

individu par deux évaluateurs différents ; plus cette mesure est stable entre les évaluateurs, plus la fiabilité inter-évaluateur est importante.

Enfin, la dernière méthode consiste à établir la fiabilité interne des mesures fournies par l'outil psychométrique. Lorsque le test permet d'obtenir différentes mesures indexant l'efficacité d'une ou plusieurs sphères cognitives (e.g. attentionnelle, exécutive, mnésique), ces mesures sont intrinsèquement censées suivre un certain schéma de corrélation et d'anti-corrélation. La fiabilité interne consiste à prouver que ces schémas corrélationnels sont en cohérence avec les liens présumés qu'entretiennent les fonctions cognitives entre elles (i.e. en cohérence avec les modèles théoriques). Les hypothèses émises pour prouver la consistance interne d'un test se basent sur les modèles théoriques ayant influencé son design.

## *ii. La validité de critère*

La validité de critère permet de déterminer à quel point une mesure du test (i.e. le prédicteur) prédit une autre mesure d'intérêt (i.e. le critère). Les deux méthodes sous-mentionnées sont principalement utilisées lorsqu'il s'agit d'établir la validité de critère d'un test.

La validité concurrente dans le cadre de la validité de critère est similaire à la méthode utilisée pour prouver la fiabilité concurrente des mesures d'un test, mais les données utilisées sont cette fois issues du domaine clinique (i.e. on privilégiera ici la comparaison des mesures standardisées plutôt que des mesures brutes). Cette méthode consiste à comparer les scores obtenus au test à valider à ceux d'autres tests déjà valides pour estimer la concordance des interprétations cliniques fournies par les différents types d'outils.

La validité prédictive, pour sa part, consiste à déterminer à quel point le test permet de détecter la présence d'un trouble. Ce type de validité peut être démontré lorsque le test est dit sensible et spécifique. La sensibilité d'un test est indexée par le taux de vrai-positifs, autrement dit le taux de patients cliniquement identifiés comme présentant réellement un trouble de la fonction cognitive évaluée par le test. La spécificité d'un test est quant à elle indexée par le taux de vrai-négatifs, soit par le taux d'individus qui ne présentent pas de trouble clinique et que le test classe bien comme ne déviant pas de la norme établie. Les scores au test doivent donc nécessairement pouvoir prédire le diagnostic clinique du

trouble, mais il se doit également de discriminer avec précision les populations cliniques et neuro-typique.

### *iii. La validité de construit*

Enfin, la validité de construit renvoie à la légitimité des inférences faites sur la base des mesures du test au regard des fondements théoriques sous-tendant sa construction. Ce type de validité consiste donc à prouver que les mesures décrivent bien un construit spécifique et exploitable.

De la même manière que pour la fiabilité des mesures en validation de contenu, la validité concurrente consiste à déterminer à quel point deux mesures d'un construit similaire sont bien liées entre elles. Les analyses réalisées dans le cadre d'une étude visant à montrer la validité de contenu d'un test peuvent donc également servir à établir sa validité de construit. Deux techniques permettent notamment d'établir la validité concurrente des mesures d'un test dans le cadre de la validité de construit.

La validité de construit d'un test peut notamment être estimée via l'utilisation d'une approche plus complète dite « multitrait-ultimethod matrix » (Campbell & Fiske, 1959). Développée durant les années 1950, cette approche consiste à créer une matrice présentant les inter-corrélations entre les différents « traits<sup>3</sup> » du test à valider via l'utilisation de plusieurs méthodes : la validité convergente et discriminante ; la méthode de trait unitaire (« trait-method unit ») qui consiste à déterminer quelle part de la variance des mesures du test est liée à la méthode utilisée pour mesurer le trait et quelle part est liée aux différences de trait chez plusieurs individus ; la multiméthode-multitrait (« multitrait-multimethod ») qui permet de déterminer si la variance des mesures du test à valider contribue à celle des mesures issues d'autres tests déjà valides ; la méthodologie de différence véritable (« truly different methodology ») consistant à déterminer à quel point les différentes mesures du test sont dissociées d'autres mesures (e.g. une mesure obtenue à l'aide d'un test informatisé peut être considérée comme réellement différente d'une mesure issu d'un questionnaire) ; et enfin la méthode de caractérisation de trait (« trait characteristics ») visant à déterminer si le degré de distinction ou de ressemblance entre différents traits permet bien de s'appuyer sur ces mêmes traits pour une analyse de type multitrait-multimethod matrix.

---

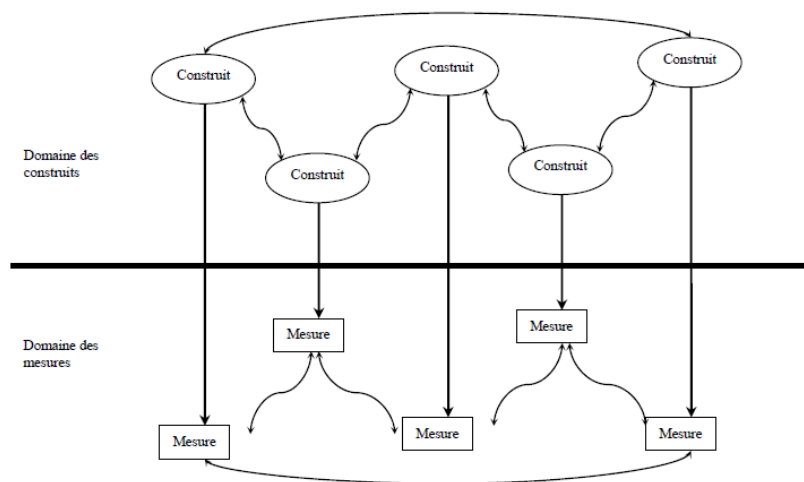
<sup>3</sup> Le concept de « trait de personnalité » en psychologie fait référence aux schémas comportementaux que présentent les individus. Par exemple, l'assurance est un trait se retrouvant de manière plus ou moins marquée chez certains individus. Dans un contexte de validation de test, le trait renvoie au concept (e.g. orientation attentionnelle ou distraction) motivant l'utilisation d'une mesure.

A SYNTHETIC MULTITRAIT-MULTIMETHOD MATRIX

| Traits   | Method 1       |                |                | Method 2       |                |                | Method 3       |                |                |       |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
|          | A <sub>1</sub> | B <sub>1</sub> | C <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | B <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | B <sub>3</sub> | C <sub>3</sub> |       |
| Method 1 | A <sub>1</sub> | (.89)          |                |                |                |                |                |                |                |       |
|          | B <sub>1</sub> | .51            | (.89)          |                |                |                |                |                |                |       |
|          | C <sub>1</sub> | .38            | .37            | (.76)          |                |                |                |                |                |       |
| Method 2 | A <sub>2</sub> | .57            | .22            | .09            | (.93)          |                |                |                |                |       |
|          | B <sub>2</sub> | .22            | .57            | .10            | .68            | (.94)          |                |                |                |       |
|          | C <sub>2</sub> | .11            | .11            | .46            | .59            | .58            | (.84)          |                |                |       |
| Method 3 | A <sub>3</sub> | .56            | .22            | .11            | .67            | .42            | .33            | (.94)          |                |       |
|          | B <sub>3</sub> | .23            | .58            | .12            | .43            | .66            | .34            | .67            | (.92)          |       |
|          | C <sub>3</sub> | .11            | .11            | .45            | .34            | .32            | .58            | .58            | .60            | (.85) |

**Figure 39** : Organisation d'une matrice de corrélation utilisée pour mesurer la validité de construit grâce à la méthode "Multitrait-Multimethod Matrix" (Campbell & Fiske, 1959).

Par ailleurs, l'approche dite des réseaux nomologiques (« nomological networks ») consiste à établir les liens hypothétiques entre différents construits et mesures de ces construits (Cronbach & Meehl, 1955). Un réseau nomologique peut être développé sur la base de modèles théoriques soulignant l'existence de liens entre différents construits hypothétiques et/ou attributs observables. D'un point de vue qualitatif, différentes mesures peuvent renvoyer à un même attribut si leur localisation dans le réseau nomologique les lie à un même construit hypothétique.



**Figure 40** : Représentation de l'organisation d'un réseau nomologique (Touzani, 2000).

### 3.4. Conclusion du chapitre

Le TDA-H est un trouble neuro-développemental fréquent ayant un impact particulièrement handicapant sur les apprentissages chez l'enfant. Pour éviter un échec scolaire et les conséquences sociales associées au TDA-H il est nécessaire de diagnostiquer les enfants le plus précocement possible. La distractibilité accrue, dans sa dimension pathologique, est une plainte récurrente chez les patients présentant un TDA-H et constitue un des symptômes cliniques permettant de diagnostiquer ce trouble. Cependant, les outils neuropsychologiques proposant une aide au diagnostic objectif des symptômes du TDA-H sont relativement peu nombreux et ne s'avèrent pas toujours ergonomiques au vu des contraintes inhérentes à la pratique clinique (notamment temps de réalisation trop long pour un temps de consultation restreint). Le paradigme CAT pourrait s'avérer assez ergonomique pour permettre de précisément caractériser l'efficacité de multiples facettes attentionnelles impliquées dans la distractibilité chez de jeunes patients. Plus particulièrement, le paradigme CAT pourrait être sensible pour mettre en lumière les déficits liés à la forme inattentive du TDA-H. Cependant, pour être utilisable en clinique, un test doit posséder une base de données normatives, répondre à différents critères de validité et être transféré du milieu de la recherche publique au milieu industriel.



## Problématique

La grande majorité des études s'intéressant au développement comportemental et cérébral de la distractibilité ont étudié ses différentes composantes de manière dissociées. Toutefois, les composantes attentionnelles impliquées dans la distractibilité interagissent : cette supposition tout d'abord théorique a été étayée par les résultats d'études s'intéressant au fonctionnement cérébral (Bidet-Caulet et al., 2015; Corbetta et al., 2008; Corbetta & Shulman, 2002; Elshafei et al., 2020; ElShafei et al., 2019; Posner et al., 1982; Posner & Boies, 1971; Posner & Driver, 1992).

Les dimensions volontaires et involontaires de l'attention sont considérées comme des composantes fondamentales de la distractibilité (Bidet-Caulet et al., 2015; Elshafei et al., 2020; ElShafei et al., 2019; Schröger & Wolff, 1998; Wetzel & Schröger, 2014). Ces deux facettes attentionnelles dépendent de réseaux cérébraux distincts mais interdépendants (Corbetta & Shulman, 2002). Toutes deux peuvent également être influencées par l'état d'alerte, qu'il soit phasique ou tonique (Aston-Jones & Cohen, 2005; Masson & Bidet-Caulet, 2019; Posner, 1980). Plus qu'une simple fonction cognitive, la distractibilité est un état variant sur le court (plusieurs minutes) ou long terme (plusieurs années). Caractériser la distractibilité à un moment précis de la vie d'un individu implique intrinsèquement la mesure simultanée de ses différentes composantes.

(i) La majorité des études réalisées par le passé se sont intéressées de manière dissociée au développement des facettes attentionnelles de la distractibilité : en ce sens, ces études n'ont permis qu'une caractérisation incomplète de son développement de l'enfance à l'âge adulte.

(ii) Bien que la distractibilité accrue constitue une des plaintes les plus fréquemment rapportées par les patients TDA-H et leur famille, il n'existe pas de test utilisable en clinique qui permette de mesurer précisément les différentes facettes attentionnelles de la distractibilité.

De récentes études ont cependant montré la pertinence des mesures fournies par un nouveau paradigme, le CAT, pour évaluer la distractibilité chez l'adulte (Bidet-Caulet et al., 2015; Elshafei et al., 2020; ElShafei, Bouet, et al., 2018; ElShafei et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019).

(i) L'objectif principal de ce travail de thèse est caractériser le développement comportemental et cérébral de la distractibilité chez l'enfant au développement typique. Dans ce but, nous avons réalisé trois études :

- L'**Etude 1** a pour but de caractériser le développement typique des manifestations comportementales de la distractibilité de 6 à 25 ans.
- L'**Etude 2** a pour objectif de caractériser le développement typique des mesures comportementales de la distractibilité chez l'enfant de 4 à 5 ans ; cette étude explore également l'influence du milieu socio-économique de l'enfant sur la trajectoire développementale des différentes facettes attentionnelles de la distractibilité.
- L'**Etude 3** a pour but d'identifier les corrélats cérébraux de la distractibilité chez l'enfant et chez l'adulte (6, 11-13 et 18-25 ans).

Actuellement, les Etudes 1 et 2 sont terminées et l'Etude 3 est en cours de finalisation.

L'objectif secondaire de ce travail de thèse vise à développer une approche méthodologique pour permettre la validation psychométrique du CAT, de sorte à pourvoir au manque d'outils neuropsychologiques permettant d'évaluer la distractibilité et ses altérations pathologiques. Nous avons ainsi mis en place une procédure de validation visant à établir sa validité de contenu, de critère et de construit. Cette procédure permettra, dans le futur, de déterminer si les mesures fournies par le CAT sont pertinentes pour détecter les altérations pathologiques de la distractibilité, notamment dans le cadre de la démarche diagnostic du trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité.

Les différents travaux de recherche visant à caractériser le développement de la distractibilité au cours de l'enfance et la procédure de validation du CAT comme nouvel outil clinique permettant de détecter les altérations pathologiques de la distractibilité sont présentés dans la suite de ce manuscrit.

Section II :

Méthode

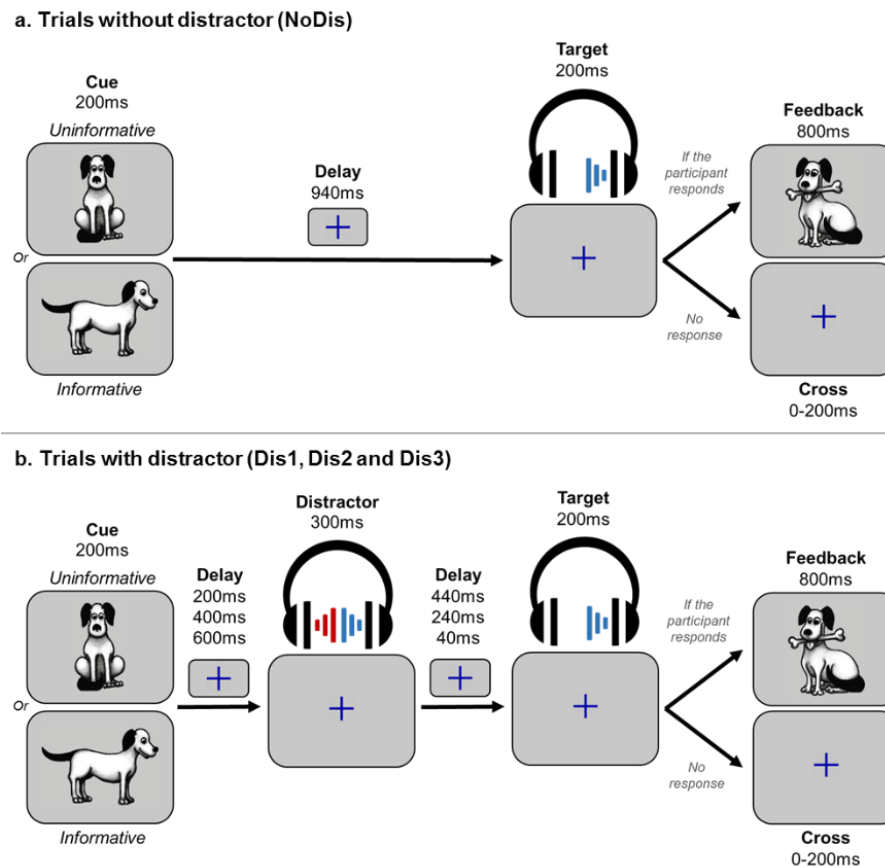
# 1. Protocole expérimental : le Competitive Attention Test (CAT)

Les différentes études présentées dans ce manuscrit s'appuient sur un même paradigme : le Competitive Attention Test (CAT).

Dans le CAT, 50% des essais (essais « NoDis ») comportent un indice visuel (200ms), suivi par un délai (950ms) puis d'un son cible (200ms). L'indice visuel est présenté au centre de l'écran - sur fond gris - et peut être (i) informatif (chien de profil allant vers la droite ou vers la gauche), ou (ii) non-informatif (chien assis de face) (Fig. 41a). Le son cible est un aboiement de chien diffusé dans un casque (15dB SL) soit dans l'oreille gauche, soit dans l'oreille droite du participant. En condition informative, l'indice indique la position spatiale du son cible à venir (droite ou gauche), tandis qu'en condition non-informative, il n'est pas possible de prédire la position spatiale du son cible. L'objectif pour le participant est de détecter le plus rapidement possible le son cible en appuyant sur un bouton de réponse (bouton gauche de la souris).

Dans les 50% des essais (essais « Dis1 », « Dis2 » et « Dis3 ») restant, le principe du test est strictement identique ; les essais sont construits de la même manière que susmentionné – indice visuel (200ms), délai (940ms), cible auditive (200ms) – mais un son distracteur (300ms, 70dB SL) est diffusé de manière binaurale durant le délai. Le son distracteur est présenté selon trois décours temporels différents (Fig. 41b). Les distracteurs peuvent apparaître 200ms, 400ms, ou 600ms après la disparition de l'indice (soit, respectivement, 740ms, 540ms et 340 ms avant le début du son cible).

Si le participant répond correctement durant les 3300ms suivant la disparition de la cible alors, 500ms après avoir appuyé sur le bouton de réponse, un 'feedback' d'une durée de 800ms (chien tenant un os dans sa gueule) apparaît à l'écran ; le 'feedback' est ensuite remplacé par une croix à fixer dont la durée d'apparition a été randomisée entre 1700ms et 1900ms. Si le participant ne répond pas durant les 3300ms suivant la disparition de la cible, la croix de fixation est affichée à l'écran durant une période supplémentaire de 100 à 300ms.



**Figure 41** : Illustration du paradigme CAT. a) Essais sans distracteur : l'indice apparaît (200ms), suivi d'un délai (940ms) puis de l'apparition du son cible (200ms). Si le participant répond correctement un 'feedback' (800ms) est affiché à l'écran. b) Essais avec distracteur : l'indice apparaît (200ms), suivi d'un son distracteur (300ms) pouvant apparaître selon 3 délais différents (740ms, 540ms ou 340ms) après la disparition de l'indice), et du son cible. Si le participant répond correctement un 'feedback' (800ms) est affiché à l'écran.

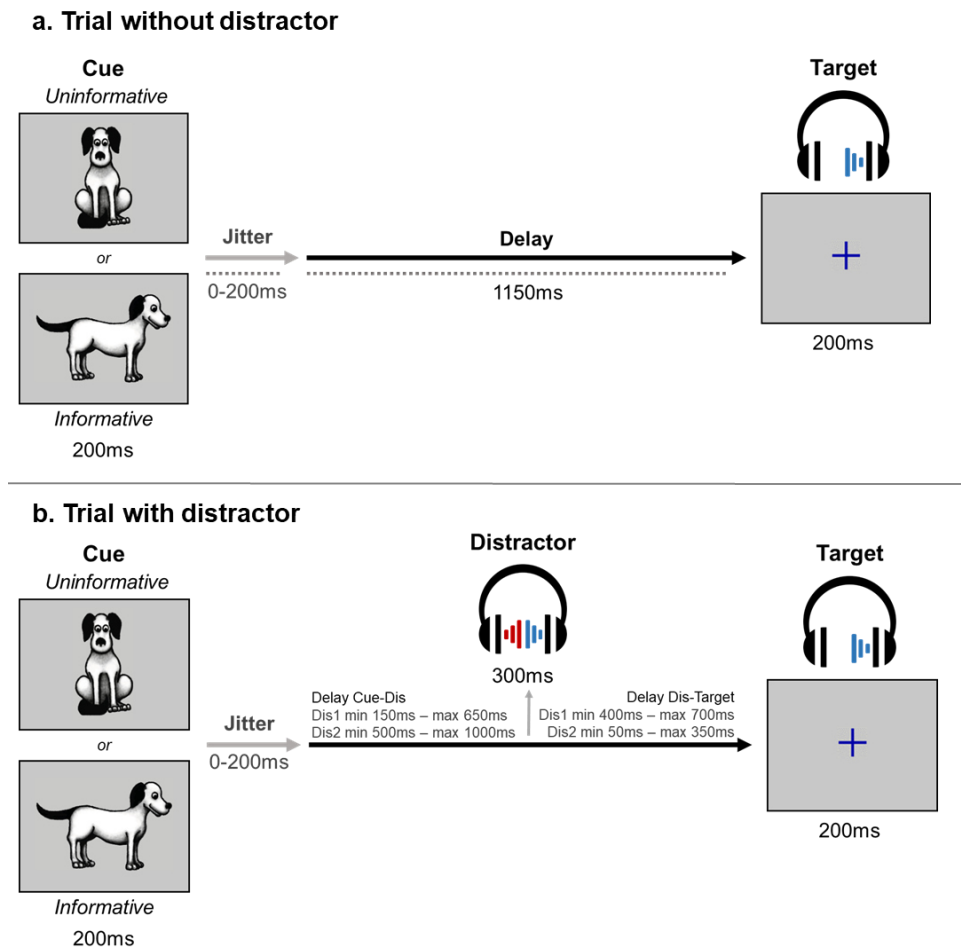
Le type d'indice et la position de la cible (droite ou gauche) sont manipulés de manière équivalente et proportionnelle pour tous les essais qu'ils comportent, ou non, un son distracteur. Pour chacun des essais comportant un même type d'indice le son cible était joué 50% du temps dans l'oreille droite, 50% du temps dans l'oreille gauche.

De sorte à limiter les effets d'habituation, un total de 18 sons différents a été utilisé pour les sons distracteurs (sonnerie de téléphone, alarme de réveil, etc.).

Dans toutes les études mentionnées dans ce manuscrit, l'ordre de présentation des blocs a été randomisé. Après chacun des blocs l'expérimentateur fait un retour sur ses performances au participant.

Dans ce manuscrit, seule l'étude 3 impliquant des enregistrements EEG comprend une version modifiée du paradigme (Fig. 42). Une étude en EEG nécessite un plus grand nombre d'essais par condition qu'une étude en comportement, ce qui augmente de manière considérable la durée de l'expérience. Les modifications apportées au protocole

pour l'EEG ont pour objectif de réduire au maximum la durée de l'expérience (particulièrement longue pour les jeunes enfants) et l'effet d'habituation lié à la présentation répétée des stimuli.



**Figure 42** : Illustration du paradigme CAT-EEG. a) Essais sans distracteur : l'indice apparaît (200ms), suivi d'un premier délai de durée aléatoire (0 à 200ms), d'un second à durée fixe (1150ms), puis de l'apparition du son cible (un aboiement de chien ; 200ms). b) Essais avec distracteur : l'indice apparaît (200ms), suivi d'un premier délai de durée aléatoire (0 à 200ms), d'un second à durée fixe (1150ms). Durant le délai indice-cible, un son distracteur (type sonnerie de réveil ; 300ms) est joué. Le son distracteur peut débiter 700-1000ms (Dis1) ou 350-650ms (Dis2) avant le début du son cible.

Les différences entre le CAT et le CAT-EEG sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (Tab. 5) :

**Tableau 5** : Comparaison des différentes versions du paradigme CAT. La version du paradigme utilisée dans toutes les études comportementales décrites dans ce manuscrit (Etude 1 et 2, ainsi que les études mentionnées dans la section V) est présentée à gauche, tandis que la version utilisée dans l'étude en EEG (Etude 3) est présentée à droite.

|   | <b>CAT</b><br>(used in studies 1 and 2, and in all experiments mentioned in the methodological approach) | <b>CAT-EEG</b><br>(used in Study 3)                               |
|---|--|---|
| Number of blocks  | 3  | 16  |
| Duration per block  | ~5min  | ~3min   |
| Duration for all blocks                                   | ~15min   | ~48min  |
| Number of trials per block                                | 48   | 32  |
| NoDis trial   | 50,0%  | 63,0%   |
| Dis trial   | 50,0%  | 37,0%   |
| Informative trial   | 75,0%  | 50,0%   |
| Uninformative trial                                       | 25,0%  | 50,0%   |
| Cue onset - Target onset time                             | 1140ms   | min: 1150ms, max: 1350ms  |
| Number of distracting sounds used in the whole experiment | 18   | 48  |
| Number of distractor positions                            | 3  | 2   |
| Distractor onset - Target onset time                      | Delay 1: 740ms<br>Delay 2: 540ms<br>Delay 3: 340ms   | Delay 1 : min 700ms; max 1000ms<br>Delay 2 : min 350ms; max 650ms |
| Feedback for correct answer                               | Yes (800ms duration)   | No  |
| Inter-trial interval                                      | When participants respond:<br>1700-1900ms  | When participants respond:<br>1700-1900ms                         |
|   | No response: min 3400ms; max 3600ms  | No response: min 3100ms; max 3300ms                               |

## 2. Procédure expérimentale

Avant de commencer le test, les participants sont informés qu'ils vont devoir accomplir un test de concentration et de rapidité, durant lequel ils devront cliquer le plus rapidement possible sur un bouton de la souris ou une touche du clavier dès qu'ils entendent le son cible. L'expérimentateur insiste toujours sur le fait que, pour apporter une bonne réponse, il ne faut ni appuyer trop tôt, ni appuyer trop tard lorsque le chien aboie. Les consignes pour réaliser le CAT sont identiques dans toutes les études présentées dans la suite de ce manuscrit.

Lors de la réalisation de l'Etude 2 (population de 4-5 ans), une carte au trésor a été utilisée en plus des instructions pour motiver les participants : pour chaque bloc de l'expérience réalisé, l'enfant avançait un pion d'île en île pour finalement rejoindre l'île au trésor. Pour réduire au maximum le temps de l'expérience chez ces tout jeunes enfants, il n'a pas été proposé de mesure du seuil auditif, ni de bloc d'entraînement à ces enfants. Le niveau auditif a été fixé arbitrairement à 75 dBA chez tous les enfants de l'étude 2.

Pour les études 2 (enfants en bas âge) et 3 (durée d'expérience importante), les enfants recevaient un jouet en guise d'indemnisation à la fin de l'expérience. Pour l'Etude 3, les adultes étaient indemnisés (10€ / heure) pour leur participation.

Une comparaison synthétique des procédures utilisées lors des différentes études qui seront détaillées dans ce manuscrit est présentée ci-dessous (voir Tab. 6).

**Tableau 6** : Comparaison des différentes procédures utilisées dans les études présentées dans le manuscrit. Les différentes versions de la procédure impliquent des différences concernant la passation - ou non - d'un seuil auditif avant le début de l'expérience, des différences concernant la forme des instructions données au participant, la réalisation ou non d'un court entraînement avant l'expérience, et enfin des différences concernant l'obtention - ou non - d'une récompense à la fin de l'expérience.

| <i>Study</i>  | <i>Auditory threshold</i> | <i>Instructions</i>  | <i>Training block</i> | <i>Reward at the end of the experiment</i> |
|---|---------------------------|----------------------|-----------------------|--|
| <b>Study 1</b>  | Yes                       | Typical version      | Yes                   | No   |
| <b>Study 2</b>  | No                        | Treasure map version | No                    | Yes  |
| <b>Study 3</b>  | Yes                       | Typical version      | Yes                   | Yes  |
| <b>Studies mentioned in the methodological approach section</b> | Yes                       | Typical version      | Yes                   | No   |

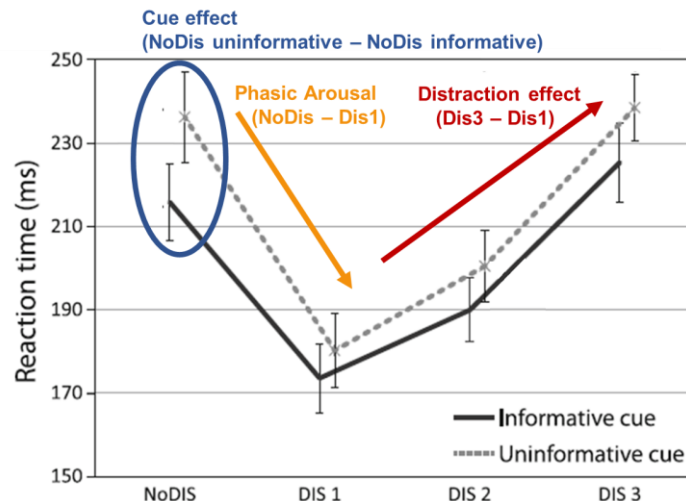


### 3. Marqueurs comportementaux utilisés pour les analyses statistiques

Pour chacune des études qui seront décrites dans la suite de ce manuscrit, nous avons extrait 8 mesures comportementales que nous avons analysées (voir Fig. 43).

#### 3.1. Temps de réaction

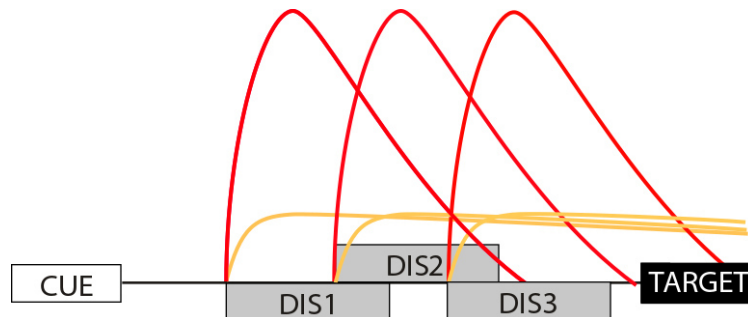
Les études précédemment réalisées (Aurélié Bidet-Caulet et al., 2015; ElShafei, Forni, et al., 2018; ElShafei et al., 2019) ayant utilisé le CAT chez l'adulte indiquent que les TR obtenus dans les différentes conditions du test permettent de mesurer l'efficacité de différents types de processus attentionnels.



**Figure 43** : Représentation des TR en fonction de la condition du test CAT. L'effet de l'orientation attentionnelle volontaire peut être mesuré en soustrayant les TR obtenus en condition non-informatif et informatif dans les essais sans distracteur (NoDis Uninformative – NoDis Informatif). L'effet de l'alerte phasique peut être mesuré en soustrayant les TR obtenus en condition sans distracteur et en condition distracteur 1 (NoDis – Dis1). L'effet de distraction peut être mesuré en soustrayant les TR obtenus en condition distracteur 3 et en condition distracteur 1 (Dis3 – Dis1).

En soustrayant les TR obtenus en condition NoDis non-informatif et NoDis informatif, le CAT permet de mesurer l'orientation et l'anticipation attentionnelles volontaires (voir Fig. 43). En soustrayant les TR obtenus en condition NoDis et Dis1, le CAT permet de mesurer l'effet facilitateur de l'alerte phasique engendré par un son distracteur (voir Fig. 43 et Fig. 44). En soustrayant les TR obtenus en condition Dis3 et Dis1 le CAT permet de mesurer

l'effet délétère de la distraction sur les TR, ce indépendamment de l'effet facilitateur de l'alerte phasique.



**Figure 44** : Représentation schématique du déroulement temporel des effets d'alerte phasique et de distraction engendrés par la survenue d'un distracteur dans le CAT. L'effet de l'alerte phasique est modéré mais assez stable dans le temps au cours de l'essai (lignes jaunes). L'effet de distraction est puissant mais transitoire (lignes rouges). Lorsque le distracteur arrive précocement durant l'essai (Dis1), son effet est toujours observable lors de l'apparition de la cible, tandis que l'effet de distraction est déjà terminé. Lorsque le distracteur arrive tardivement durant l'essai (Dis3), l'effet d'alerte phasique et l'effet de distraction sont observables lors de l'apparition de la cible.

Le CAT permet également de mesurer la variabilité des temps de réaction au cours des différents blocs du test. L'écart type des temps de réaction en condition NoDis au CAT permet ainsi de mesurer l'attention soutenue.

### 3.2. Types de réponse

Chez l'adulte, les TR sont des indicateurs particulièrement pertinents pour étudier la distractibilité. Cependant, avant l'adolescence, nous avons constaté que les enfants avaient tendance à manquer les cibles ou à répondre avant l'apparition de cette dernière. Pour mieux comprendre l'origine de ces réponses manquées et erronées, nous avons cherché à les catégoriser finement (voir Fig. 45). La méthode de catégorisation des différents types de réponse est détaillée de manière précise dans les trois études qui seront présentées dans la section suivante de ce manuscrit. En résumé, les types de réponse considérés dans les différentes études que nous avons réalisées sont les suivants :

### Les réponses tardives (%)

Nous avons défini un seuil individuel en TR permettant de dissocier réponses correctes et réponses tardives. Lorsque le participant répondait après un seuil individuel de TR la réponse n'était pas catégorisée comme correcte mais comme tardive (« outlier »). Le seuil individuel en TR a été calculé grâce aux intervalles interquartiles (méthode de Tukey). En **condition sans distracteur**, les réponses tardives traduisent un **décrochage attentionnel** momentané, tandis qu'en **condition avec distracteur**, ces réponses indexent l'**effet de distraction**.

### Les réponses manquées (%)

En **condition sans distracteur**, les réponses manquées indexent un **décrochage attentionnel** particulièrement long. En **condition avec distracteur**, une réponse manquée reflète un décrochage attentionnel lié à un **effet de distraction** assez important ou long pour entraîner l'omission de la cible, ou d'une difficulté à réorienter l'attention sur la tâche suite à la capture involontaire de l'attention par un stimulus distracteur.

### Les réponses aux distracteurs (%)

Les réponses aux distracteurs sont les réponses émises pendant, ou très peu de temps après, la présentation des sons distracteurs. Ces réponses indexent l'**impulsivité réactive** aux stimuli non pertinents. La quantité de ressources attentionnelles utilisée pour le traitement du distracteur pourrait en effet réduire celle disponible pour l'inhibition de la réponse motrice, ceci poussant les participants à réagir aux distracteurs.

### Les réponses anticipées à la cible (%)

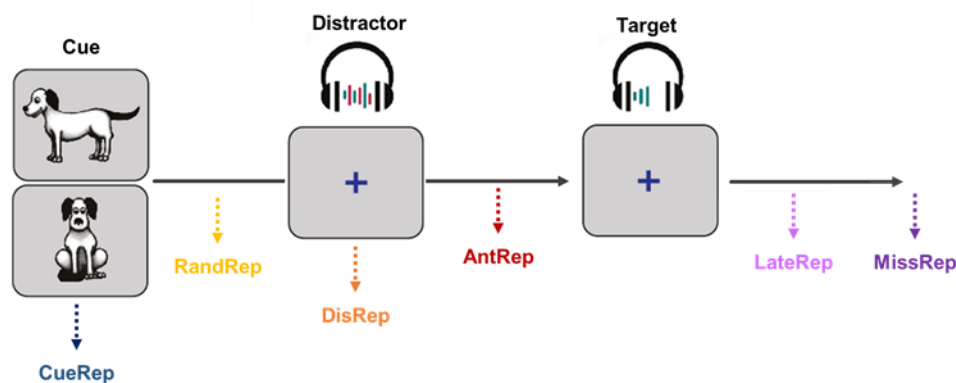
Les réponses anticipées sont émises avant que le cerveau n'ait eu le temps de traiter le son cible, soit peu de temps avant le début de la cible, ou peu de temps après son commencement. Les réponses anticipées indexent l'**impulsivité proactive** aux stimuli pertinents ; ce type de comportement impulsif pourrait être dû à une erreur de prédiction temporelle concernant l'apparition du son cible, ou à une difficulté d'inhibition motrice lors du déploiement des processus de prédiction.

### Les réponses à l'indice (%)

Les réponses à l'indice comprennent les réponses émises pendant la présentation de l'indice, et celles réalisées peu de temps après sa disparition. Ce type de réponse indexe l'**impulsivité réactive** aux stimuli pertinents. Ces réponses pourraient être liées à une erreur d'appréciation des caractéristiques du stimulus : le participant répond à un stimulus pertinent pour réaliser la tâche, mais cette réponse est erronée car le dit stimulus n'est pas le stimulus cible.

### Les réponses aléatoires (%)

Les réponses survenant au cours de l'essai et dont la survenue ne peut être expliquée par l'apparition d'un stimulus (pertinent ou non pertinent) ont été catégorisées comme des réponses aléatoires. Ces réponses indexent le **contrôle moteur** ; leur survenue pourrait être liée à une difficulté d'inhibition motrice qui s'exprimerait quand bien même les ressources cognitives sont disponibles pour le maintien de l'inhibition (i.e. lorsque les ressources ne sont pas mobilisées pour le traitement d'un stimulus particulier).



**Figure 45** : Schéma des différents types de réponses comportementales extraites et analysées suite à la réalisation du CAT par les participants. **CueRep** : réponses à l'indice, **RandRep** : réponses aléatoires, **DisRep** : réponses aux distracteurs, **AntRep** : réponses anticipées, **LateRep** : réponses tardives, **MissRep** : réponses manquées. *Note : le décours temporel précis pour la classification des différentes réponses comportementales est documenté dans chacune des études figurant dans la suite de ce manuscrit.*

### 3.3. Marqueurs comportementaux fournis par le CAT et aspects cognitifs évalués : synthèse

En s'appuyant sur ces 8 mesures, le CAT permet d'évaluer l'efficacité de différentes facettes attentionnelles impliquées dans la distractibilité (voir Tab. 7).

**Tableau 7** : Mesures comportementales fournies par le CAT. Ce tableau récapitule les différents aspects cognitifs évalués par le CAT, les mesures qui y sont associées et les conditions utilisées pour le calcul de ces mesures. P-RT : positive RT.

| Measured cognitive aspects                                      | Measures  | Experimental conditions |
|---|---|-------------------------|
| Processing speed  | Median of positive RT (p-RT)                          | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    |
| <b>Sustained attention</b>                                      | Mean standard deviation of p-RT                       | NoDis                   |
| <b>Sustained attention</b> (attentional lapses)                 | Late responses  | NoDis                   |
| <b>Sustained attention</b> (attentional lapses)                 | Missed responses                                      | NoDis                   |
| <b>Voluntary orientation and anticipation</b>                   | Median of p-RT NoDis Uninf - Median of p-RT NoDis Inf | NoDisUninf-NoDisInf     |
| <b>Distraction</b>  | Median of p-RT Dis3 - Median of p-RT Dis1             | Dis3-Dis1               |
| <b>Distraction</b> (attentional lapses)                         | Late responses  | Dis1+Dis2+Dis3          |
| <b>Distraction</b> (attentional lapses)                         | Missed responses                                      | Dis1+Dis2+Dis3          |
| <b>Impulsivity</b> (reactive impulsivity to irrelevant stimuli) | Distractor responses                                  | Dis1+Dis2+Dis3          |
| <b>Impulsivity</b> (proactive impulsivity to relevant stimuli)  | Anticipated responses                                 | NoDis+Dis1              |
| <b>Impulsivity</b> (reactive impulsivity to relevant stimuli)   | Cue responses   | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    |
| <b>Motor control</b>  | Random responses                                      | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    |
| <b>Phasic alertness</b> (i.e. arousal facilitation effect)      | Median of p-RT NoDis - Median of p-RT Dis1            | NoDis-Dis1              |

Si plusieurs mesures du CAT évaluent bien des construits différents, il convient néanmoins de garder à l'esprit que plusieurs mesures peuvent, ensemble et de manière complémentaire, refléter l'efficacité d'une même facette attentionnelle (e.g. l'attention soutenue peut être évaluée grâce à la mesure RT SD, mais également grâce aux mesures LateRep et MissRep).

Section III :

# Travaux expérimentaux

## 1. Title and abstract

### **Why are children so distractible? Development of attention and motor control from childhood to adulthood.**

Hoyer R.S.<sup>1</sup>, Elshafei H.<sup>1</sup>, Hemmerlin J.<sup>1</sup>, Bouet R.<sup>1</sup>, Bidet-Caulet A<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> *Lyon Neuroscience Research Center (CRNL), INSERM UMRS 1028, CNRS UMR 5292, Université Claude Bernard Lyon 1, Université de Lyon, Lyon, France*

Distractibility is the propensity to behaviorally react to irrelevant information. Though children are more distractible the younger they are, the precise contribution of attentional and motor components to distractibility and their developmental trajectories have not been characterized yet. We used a new behavioral paradigm to identify the developmental dynamics of components contributing to distractibility in a large cohort of participants (N=352; age: 6-25). Results reveal that each measure of these components, namely voluntary attention, distraction, impulsivity and motor control, present a distinct maturational timeline. In young children, increased distractibility is mostly the result of reduced sustained attention capacities and enhanced distraction, while in teenagers, it is the result of decreased motor control and increased impulsivity.

## 2. Introduction

Remember a time when you were at school, listening to your teacher, and a driver honking their horn in the street or a classmate laughing might have caught your attention. These distractors interrupted your listening and note-taking. Healthy adults can easily focus on the task at hand again, unless the task-irrelevant distractor is significant or vitally important and requires changing behavior (e.g. a fire alarm). This capacity to be both task-efficient and aware of the surroundings without being constantly distracted requires a balance between voluntary and involuntary forms of attention. Voluntary attention enables performing an ongoing task efficiently over time by selecting relevant information and inhibiting irrelevant stimuli, while involuntary attention is captured by an unexpected salient stimulus, leading to distraction. Distractibility can then be considered as an attention state determining the propensity to have attention captured by irrelevant information and to behaviorally react to this information. At the brain level, voluntary and involuntary attention rely on partially overlapping dorsal and ventral brain networks, respectively (Corbetta & Shulman, 2002). In adults, the dorsal and ventral networks of attention have been found to be supported by activity in different frequency bands (alpha and gamma, respectively) and to interact within the prefrontal cortex (ElShafei, Bouet, et al., 2018; ElShafei et al., 2019). Increased distractibility with healthy aging has been associated with an imbalance between voluntary and involuntary attention spearheaded in the prefrontal cortex (Elshafei et al., 2020). Behaviorally, children are more distractible (Wetzel et al., 2015) compared to adults, though the interplay between voluntary and involuntary attention has been poorly documented in children. In ecological environments that are rich in distracting information, increased distractibility can be caused by (i) a reduced capacity to voluntarily pay attention to relevant events, (ii) an enhanced reaction to unexpected irrelevant distractors, or (iii) both. A better understanding of the causes of increased distractibility is crucial to improve rehabilitation or training programs to boost attention.

At the level of the brain, maturation progresses in a back-to-front direction from 6 to 18 years old (Toga et al., 2006). This cortical maturation appears to occur first in the primary sensory-motor cortex and progress into secondary, multimodal, and eventually supramodal cortices through childhood, with a protracted maturation of the prefrontal cortex (Gogtay, et al., 2004; Toga et al., 2006). Regarding attentional functioning, this postero-anterior maturation gradient is likely to support a shift in strategy from a posterior involuntary orienting network to engagement of an anterior voluntary attention network (Padilla et al., 2014; Smith et al., 2011), and a shift from a reactive to a proactive cognitive



control (Andrews-Hanna et al., 2011a; Chevalier et al., 2014; Lucenet & Blaye, 2014; Munakata et al., 2012).

Among the different facets of voluntary attention, two components related to distractibility have been behaviorally investigated: attentional orienting and sustained attention (Kanaka et al., 2008; Lin et al., 1999; Posner, 1980, 2012). The processing of relevant information can be proactively amplified by voluntary attentional processes allowing improved anticipation of upcoming events and sustained focus on ongoing tasks (Doebel et al., 2017; Gaspar & McDonald, 2014; Marini et al., 2016; Sawaki et al., 2012; Serences et al., 2004). Voluntary orienting of attention operates by proactively enhancing the processing of relevant information and inhibiting irrelevant events (van Zomeren & Brouwer, 1994; Posner, 1980, 2012). Posner paradigms with endogenous informative or uninformative cues have been used to measure the voluntary orienting of attention in anticipation of a target in children (Mezzacappa, 2004; Reis Lellis et al., 2013; Ross-Sheehy et al., 2015; Rueda et al., 2004). Results are conflicting: some show that the capacity to voluntarily orient attention is mature in children (Rueda et al., 2004) and even before the age of six (Ross-Sheehy et al., 2015), while others show that the benefit in reaction times (RT) to targets following informative cues increases from the age of 6 to adulthood (Mezzacappa, 2004; Reis Lellis et al., 2013).

These findings suggest that the voluntary orienting of attention may improve during childhood, but its precise developmental trajectory remains unclear. Sustained attention is the ability to maintain the attentional focus over time on a given task (Betts et al., 2006; Oken et al., 2006; Parasuraman et al., 1989). It relies on tonic arousal, also called vigilance (Levy, 1980). In children, sustained attention was mostly measured using detection tasks of targets among non-target stimuli presented at a fast rate (e.g. Continuous Performance Test; Conners & Sitarenios, 2011). A reduction in RT variability, as well as in the number of false alarms and missed responses, has been observed from the age of 5 until early adulthood (Betts et al., 2006; Kanaka et al., 2008; Lin et al., 1999; Thillay et al., 2015). These findings suggest a continuous maturation of sustained attention throughout childhood and adolescence with critical maturation steps at 6 and 13 years old. To our knowledge, no study has investigated the developmental trajectory of sustained attention in a more ecological context including distracting events.

Only a few studies have attempted to characterize the impact of distracting events on ongoing performance in children. Unexpected irrelevant salient sounds induce distraction (i.e. the reactive allocation of attention and resources to this salient event followed, if

possible, by a reallocation of attention and resources towards the task), resulting in a behavioral cost in the task at hand (Bidet-Caulet et al., 2015; Escera, Alho, et al., 2000; Näätänen, 1992). But they also trigger a burst of phasic arousal according to the sound properties, resulting in behavioral benefits (Bidet-Caulet et al., 2015; Masson & Bidet-Caulet, 2019; Max et al., 2015; Näätänen, 1992; Wetzel et al., 2012). Distraction was mostly investigated using audio-visual oddball paradigms, involving the discrimination of targets preceded by task-irrelevant standard or novel sounds (Escera, Alho, et al., 2000; Wetzel et al., 2012; Wetzel & Schröger, 2007, 2014). Lower hit rates and longer reaction times to targets preceded by novel sounds are considered a measure of deviance distraction. These measures were found to improve from childhood to adulthood (Olesen et al., 2007; Wetzel et al., 2006; Wetzel & Schröger, 2007), suggesting a reduction in distraction with age. The burst of arousal triggered by salient sounds would be mediated by the norepinephrine system, and it results in a transient and non-specific state of readiness to respond to any upcoming stimulus (Aston-Jones & Cohen, 2005a; Corbetta et al., 2008). Phasic arousal to sounds can be indirectly measured through pupil dilation (Widmann et al., 2018) which was found contingent to brain maturation processes (Wetzel, Schröger, et al., 2016). Previous works have shown that an increase in phasic arousal can also lead to an increased false alarm rate (Aston-Jones & Cohen, 2005; Duncan et al., 2016). Impulsivity is the tendency to act without forethought and to fail to appreciate circumstances related to the present situation (Barratt & Patton, 1983; Stanford et al., 2009). An increased false alarm rate is typically observed in impulsive persons and could result from an enhanced phasic arousal (Eysenck & Eysenck, 1985; Houston & Stanford, 2001; Zhang et al., 2015) coupled – or not – with a lack in motor control (Booth et al., 2003; Kanaka et al., 2008; van den Wildenberg & Crone, 2005; Wright et al., 2003). False alarms in the absence of a distractor might reflect difficulty in maintaining an efficient proactive control. By contrast, a false alarm following the occurrence of a distractor, or a response to the distractor itself, might indicate a difficulty in reactive control. Distractors can indeed be suppressed reactively, when a salient but irrelevant stimulus captures attention and its behavioral consequence needs to be wiped out (Gaspar & McDonald, 2014; Geng & DiQuattro, 2010). To that extent, a better understanding of the developmental trajectories of distraction, phasic arousal and impulsivity triggered by an unexpected salient event would help disentangle the maturation of proactive and reactive attentional control.

In sum, previous behavioral studies have shown that voluntary orienting of attention, sustained attention, distraction, phasic arousal, impulsivity and motor control follow different developmental trajectories, which remain to be specified. Despite the importance

of distractibility, its developmental trajectory is currently unknown. The aim of the present study is to specify the maturational timeline of the different components of distractibility in people between 6 and 25 years old. We used an adaptation of a recently developed paradigm, the Competitive Attention Task (CAT; Bidet-Caulet et al., 2015). This paradigm combines the Posner task and the oddball paradigm to provide simultaneous and dissociated measures of voluntary attention, distraction, phasic arousal, impulsivity and motor control. To assess voluntary attention orienting, the CAT includes informative and uninformative visual cues respectively indicating – or not – the spatial location of a forthcoming auditory target which is to be detected. To measure distraction, the CAT comprises trials with a task-irrelevant distracting sound preceding the target according to several delays. This change in distractor timing onset allows the dissociation of the effects of distraction and phasic arousal. Moreover, similarly to other detection tasks, the rates of different types of false alarms, late and missed responses provide measures of sustained attention, impulsivity and motor control.

Based on the literature on the development of both the brain and attention capacities, we hypothesized a move from a reactive to a proactive strategy for attentional control from early childhood to adulthood (Blackwell & Munakata, 2014; Chevalier et al., 2014; Munakata et al., 2012). More precisely, young children are expected to present stronger behavioral manifestations in reaction to distracting sounds such as increased rates of responses to distractors, but also of late and missed responses to targets following a distractor. Proactive attentional control is likely to mature later. Better voluntary attention performances (e.g. reduced RT variability, reduced late response and false alarm rates and larger cue effect on RTs in trials with no distractor) are expected during adolescence. In summary, distraction would first decrease during early childhood, followed by an improvement in motor control, and a protracted maturation of voluntary attention. As previous studies show an increased motor speed during spatial attention tasks in men, gender was taken into account in the present study (Gur & Gur, 2017; Jain et al., 2015; Merritt et al., 2005).

## 3. Methods

### 3.1. Participants

415 subjects participated in the study. Typically developing children from the 1st to 12th grade were recruited in public and private schools. Adults were recruited through flyers and email lists. Data from 63 participants were excluded from the analysis, either because of neurological disorders or substance use (N=9), auditory problems (N=2), non-compliance with the instructions (N=17), correct trial percentage < 50% in NoDis condition (N=11) or technical issues (N=24). A total of 352 subjects (88% right-handed, 51% female, 6 to 25 years old) were included in the analysis. All subjects had normal hearing and normal or corrected-to-normal vision. Participants were divided into 14 age groups (Table 1). For participants under the age of 18, signed informed consent was obtained from both parents, and assent was given by the children. All adult participants (18-25 years old) gave written informed consent. This study was conducted according to the Helsinki Declaration, Convention of the Council of Europe on Human Rights and Biomedicine, and the experimental paradigm was approved by the French ethics committee Comité de Protection de Personne for testing in adults and children.

Groups were matched for gender and handedness. Age groups from 6 to 17 years of age were matched for economic status (SES, see Fig. S1) and educational level of their parents (0 = no diploma, 1 = vocational certificate obtained after the 9<sup>th</sup> grade, 2 = high school diploma; 3 = 12<sup>th</sup> grade / associate's degree; 4 = bachelor degree; 5 = master degree and further). The 18 to 25-year-old participants reported their own SES and education level: around 80% were students at the university and 20% were employees.

**Table 1 | Characteristics of the population sample.** Detailed samples by age for gender, handedness, mean parent education level for children and mean education level for adults, total ADHD scale scores and thresholds of auditory perception ( $\pm$  standard error of the mean, SEM). Please note that the mean age in years and months in each group cannot be provided since only participants' age in years was collected.

| Age   | Samples |          | Gender   |      | Handedness |       | Mean education | ADHD score              | Threshold of auditory perception (dBA) |                |
|-------|---------|----------|----------|------|------------|-------|----------------|-------------------------|--|----------------|
|       | Range   | Included | Excluded | Male | Female     | Right | Left           | Max education level = 5 | Max score Children = 54 Adults = 72    | Right ear      |
| 6     | 24      | 6        | 54%      | 46%  | 88%        | 12%   | 3.3 $\pm$ 0.2  | 17.8 $\pm$ 1.7          | 26.8 $\pm$ 2.3                         | 26.0 $\pm$ 3.0 |
| 7     | 22      | 13       | 55%      | 45%  | 91%        | 9%    | 3.5 $\pm$ 0.2  | 17.0 $\pm$ 2.0          | 26.9 $\pm$ 2.2                         | 29.4 $\pm$ 2.4 |
| 8     | 24      | 5        | 54%      | 48%  | 88%        | 12%   | 2.7 $\pm$ 0.2  | 18.5 $\pm$ 1.2          | 24.8 $\pm$ 2.5                         | 26.3 $\pm$ 2.5 |
| 9     | 28      | 6        | 54%      | 45%  | 75%        | 25%   | 3.6 $\pm$ 0.2  | 17.9 $\pm$ 1.6          | 25.2 $\pm$ 2.3                         | 25.5 $\pm$ 2.5 |
| 10    | 36      | 1        | 47%      | 53%  | 92%        | 8%    | 3.0 $\pm$ 0.2  | 16.4 $\pm$ 1.4          | 25.1 $\pm$ 1.9                         | 21.9 $\pm$ 1.5 |
| 11    | 25      | 3        | 40%      | 60%  | 92%        | 8%    | 3.4 $\pm$ 0.2  | 12.8 $\pm$ 1.8          | 29.1 $\pm$ 2.9                         | 29.1 $\pm$ 2.3 |
| 12    | 28      | 4        | 54%      | 46%  | 89%        | 11%   | 3.3 $\pm$ 0.2  | 9.1 $\pm$ 1.7           | 33.1 $\pm$ 2.1                         | 32.3 $\pm$ 1.9 |
| 13    | 25      | 4        | 52%      | 48%  | 92%        | 8%    | 2.9 $\pm$ 0.3  | 10.2 $\pm$ 1.8          | 32.2 $\pm$ 2.0                         | 31.3 $\pm$ 1.8 |
| 14    | 25      | 8        | 44%      | 56%  | 92%        | 8%    | 3.8 $\pm$ 0.2  | 7.8 $\pm$ 1.2           | 29.4 $\pm$ 2.4                         | 28.2 $\pm$ 2.1 |
| 15    | 24      | 4        | 58%      | 42%  | 92%        | 8%    | 3.0 $\pm$ 0.2  | 9.5 $\pm$ 1.5           | 28.2 $\pm$ 2.7                         | 27.0 $\pm$ 2.4 |
| 16    | 22      | 2        | 50%      | 50%  | 95%        | 5%    | 3.7 $\pm$ 0.2  | 9.9 $\pm$ 1.4           | 31.4 $\pm$ 2.7                         | 31.5 $\pm$ 2.9 |
| 17    | 26      | 4        | 38%      | 59%  | 88%        | 12%   | 2.7 $\pm$ 0.2  | 8.1 $\pm$ 1.7           | 32.9 $\pm$ 2.5                         | 31.3 $\pm$ 2.2 |
| 18-20 | 23      | 2        | 39%      | 61%  | 83%        | 7%    | 1.4 $\pm$ 0.2  | 34.5 $\pm$ 3.4          | 22.5 $\pm$ 2.5                         | 20.0 $\pm$ 1.6 |
| 21-25 | 20      | 1        | 50%      | 50%  | 80%        | 20%   | 4.0 $\pm$ 0.3  | 30.6 $\pm$ 3.0          | 19.7 $\pm$ 1.5                         | 19.7 $\pm$ 1.4 |

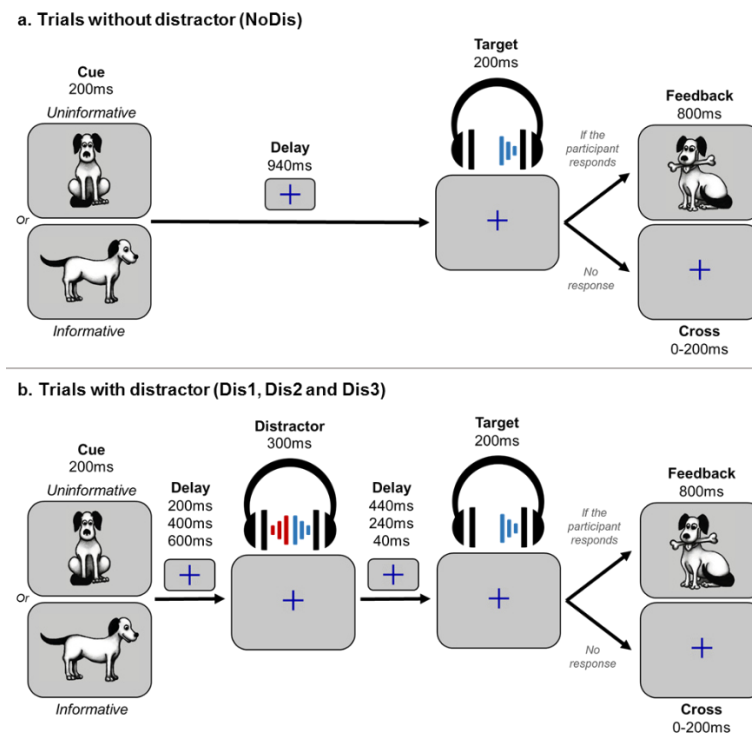
### 3.2. Stimuli and Task

50 % of the trials (Fig. 1a) consisted of a visual cue (200-ms duration) followed, after a 950-ms delay, by a 200-ms target sound. The cue was presented centrally on a screen with a gray background and could either be a dog facing left or right, or a dog facing forward. The target sound was the sound of a dog barking monaurally presented at 15 dB SL (around 43 dBA) in headphones.

In the other 50 % of the trials, the trial structure was identical, but a binaural distracting sound (300-ms duration) was played during the delay (Fig. 1b) at 35 dB SL (around 61 dBA). A total of 18 different distracting sounds were used (phone ringtone, clock-alarm, etc.) for each participant. The distracting sound could be equiprobably played at three different times during the delay: 200 ms (Dis1), 400 ms (Dis2) and 600 ms (Dis3) after cue offset. One block of the task contained 24 NoDis, 8 Dis1, 8 Dis2 and 8 Dis3 trials. Therefore, during the whole experiment (3 blocks), 72 NoDis, 24 Dis1, 24 Dis2 and 24 Dis3 trials were presented.

The proportion of cue and target categories were distributed equiprobably between trials with and without distracting sound. The informative condition represented 75 % of the trials: in that case the dog was facing left or right, indicating the ear of the target sound presentation (37.5 % left and 37.5 % right). The uninformative condition represented 25 %

of the trials: the facing-front dog was followed by the target sound in the left (12.5 %) or right (12.5 %) ear.



**Fig. 1 | Protocol.** **a**, In uninformative trials, a facing-front dog was used as visual cue (200 ms duration), indicating that the target sound will be played in either the left or right ear. In informative trials, a facing left or right dog visual cue (200 ms duration) indicated in which ear (left or right, respectively) the target sound will be played (200 ms duration) after a delay (940 ms). If the participant gave a correct answer, a feedback (800ms duration) was displayed. **b**, In trials with distractor the task was similar, but a binaural distracting sound (300 ms duration) - such as a phone ring - was played during the delay between cue and target. The distracting sound could equiprobably onset at three different times: 200 ms, 400 ms, or 600 ms after the cue offset.

To compare behavioral responses to acoustically matched sounds, the same distracting sounds were played for each distractor condition (Dis1, Dis2 or Dis3) in the informative condition. Each distracting sound was played 4 times during the whole experiment, but no more than twice during each single block to limit habituation.

Subjects were instructed to perform a detection task by pressing a key as fast as possible when they heard the target sound. They were asked to focus their attention to the cued side in the case of informative cue. Participants were informed that informative cues were 100 % predictive and that a distracting sound could be sometimes played. In the absence of the visual cue, a blue fixation cross was presented at the center of the screen. Subjects were instructed to keep their eyes fixated on the cross (see Appendix S1 for full instructions). The training block was composed of 10 trials and was built following the same

time course than the task. Two trials contained distractors which belonged to the pool of 18 distracting sounds used in the experiment.

When participants answered within 3300 ms after the target onset, a dog holding a bone (800-ms duration) was presented 500 ms after the response followed by the fixation cross for a randomized period of 1700 ms to 1900 ms. If the participant did not respond during the 3300 ms post target onset, the fixation cross was displayed on the screen for an additional randomized delay of 100 ms to 300 ms. At the end of each block, the average reaction time was indicated to the participant to motivate him/her to respond as fast as possible.

### 3.3. Procedure

Participants were tested in small groups of 2 to 4. Adults were tested in the lab or at the university, and children were tested at school, all in a quiet room. Participants were seated in front of a laptop (approximately 50 cm from the screen) delivering pictures and sounds, as well as recording behavioral responses using Presentation software (Neurobehavioral Systems, Albany, CA, USA). Auditory stimuli were played through headphones.

First, the auditory threshold was determined for the target sound, in each ear, for each participant using the Bekesy tracking method. This resulted in an average target threshold across subjects of  $28 \pm 0.6$  dBA (see Table 1 for details by age range). Then, participants performed a short training of the task followed by three 4-min blocks of 48 pseudo-randomize trials each. The order of the 3 blocks was randomized through participants using a Latin square. The experimenter gave verbal instructions to the children before the test. An experimental session lasted around 30 minutes. At the end of every experimental session, the experimenter explained the aim of the study to participants and took time to answer questions.

Adults and parents of children enrolled in the study filled out a short questionnaire about their SES characteristics and respectively completed the Adult Self-Report Scale (ASRS; Kessler et al., 2005) and the Attention-Deficit Hyperactivity Disorder Rating Scale IV (ADHD RS; DuPaul et al., 1998) questionnaires, both assessing symptoms of ADHD in adults and children according to the diagnostic criteria of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, 2013). Adults also filled out the State-Trait Anxiety Inventory (STAI) Y-A and B (Spielberger et al., 1970) to evaluate anxiety as a state and trait. At the end, every minor participant answered a short post-experiment questionnaire about their motivation level, their focus state and

stress level during the CAT. The aforementioned questionnaires were administered in order to collect normative data for other research projects and the analysis of the collected responses is beyond the scope of the present study.

### 3.4. Measurement parameters

We used a custom MATLAB program to extract and preprocess behavioral data. First, we visually inspected the reaction time distribution relative to target onset for each age group (see Fig. S2). RT limits for correct responses were computed to consider the overall brain maturation effect on speed processing. For each participant, the longest reaction time for a correct response (RT upper limit) was calculated from all RT > 0ms using the John Tukey's method of leveraging the Interquartile Range. The shortest reaction time for a correct response (RT lower limit) was calculated for each age range (see Fig. S2 and Appendix S2). Thus, (i) responses before the RT lower limit were considered as a part of the false alarm response type; (ii) responses between the lower and the upper RT limits were considered as correct responses; (iii) responses after the RT upper limits were considered as late responses.

To investigate the diversity of behaviors observed during the task, the following 8 behavioral measures were analyzed further (see Fig. S3):

- Median RT of positive RTs.
- RT SD: mean standard deviation of positive RT in the NoDis condition for each block separately.
- Late response % (LateRep): the percentage of responses performed in the NoDis condition during the period starting from the RT upper-limit to 3300 ms.
- Missed response % (MissRep): the percentage of trials without any response made during the entire trial duration up to 3300 ms post-target.
- Cue response % (CueRep): the percentage of responses performed during the 150-450ms period post-cue onset.
- Distractor response % (DisRep): the percentage of responses performed during the 150-450 ms period post-distractor onset.
- Anticipated response % (AntRep): the percentage of responses performed:
  - o in NoDis and Dis1: from 300 ms pre-target to the RT lower limit post-target;
  - o in Dis2: from 150 ms pre-target to the RT lower limit post-target;



- in Dis3: from 100 ms post-target to the RT lower limit post-target.
- Random responses % (RandRep): the percentage of responses performed in the remaining periods of the trials, i.e., within the 150 ms post-cue onset and:
  - in NoDis: during the 450 to 850 ms period post-cue onset;
  - in Dis1: during the 450 to 550 ms period post-cue onset;
  - in Dis2: during the 450 to 750 ms period post-cue onset;
  - in Dis3: during the 450 to 950 ms period post-cue onset.

### 3.5. Statistical analyses

In order to test the similarity between measures or to estimate a degree of logical support or belief regarding specific results, Bayesian statistics were used. To estimate physical tendencies linked to the behavioral measurements, we used generalized linear mixed models (GLMM) in a frequentist approach.

#### *i. Socio-economic data analysis*

To confirm that our sample population was similarly distributed across age ranges in block order, handedness, and gender, we performed Bayesian contingency table tests. For children from 6 to 17-years-old only, similar analysis was performed on SES and education level of the parents. We reported Bayes Factor ( $BF_{10}$ ) as a relative measure of evidence. To interpret the strength of evidence in favor of the null model (uniform distribution), we considered a BF between 0.33 and 1 as weak evidence, a BF between 0.1 and 0.33 as positive evidence, a BF between 0.01 and 0.1 as strong evidence and a BF lower than 0.01 as a decisive evidence. Similarly, to interpret the strength of evidence against the null model, we considered a BF between 1 and 3 as weak evidence, a BF between 3 and 10 as positive evidence, a BF between 10 and 100 as strong evidence and a BF higher than 100 as a decisive evidence (Lee & Wagenmakers, 2013).

Statistical analyses of hearing threshold are presented in Table S1 and Appendix S3. Statistical analyses of attention scores are presented in Appendix S4.

Bayesian statistics were performed using JASP® software (JASP Team (2018), JASP (Version 0.9) [Computer software]).

## *ii. Behavioral data analysis*

### ***Frequentist statistical approach.***

We expected a large between-individual variability in RT and response type rates according to conditions. This behavioral response variability limits the comparison of data between the conditions and means that data cannot simply be pooled for analysis. GLMM are the best way to deal with such datasets, as they allow for correction of systematic variability (Bates et al., 2015). We accounted for the heterogeneity of performances between-subjects and experimental conditions by defining them as effects with a random intercept and slopes, thus instructing the model to correct for any systematic differences in variability between the subjects (between-individual variability) and condition (between-condition variability). To confirm the need for mixed nested models, we used a likelihood ratio analysis to test the model fit before and after sequential addition of random effects. We used the Akaike Information Criterion and the Bayesian Information Criterion as estimators of the quality of the statistical models generated (Matuschek et al., 2017). To optimize our model, we checked the normality of the model residual.

To assess the impact of the manipulated task parameters (cue information and distractor type) and of participant demographics (age and gender), on each type of behavioral measure (RT, RT SD, LateRep, MissRep, CueRep, DisRep, AntRep, RandRep), we analyzed the influence of four possible fixed effects (unless specified otherwise in the next section):

- 1) between-subject factor AGE: 14 levels (see Table 1);
- 2) between-subject factor GENDER: 2 levels (male and female);
- 3) within-subject factor CUE and CUELRN: 2 levels (CUE: informative vs. uninformative) for measures recorded after the target onset (Hit, LateRep and MissRep) and 3 levels (CUELRN: left, right and neutral) for the measures recorded before the target onset (CueRep, RandRep, DisRep and AntRep);
- 4) within-subject factor DISTRACTOR: 4 levels (NoDis, Dis1, Dis2 and Dis3), except for DisRep: 3 levels (Dis1, Dis2 and Dis3).

A summary of the data and factors used in statistical modeling can be found in Table 2. Please note that for response types cumulating less than 1 % of response proportion across the total sample (cue and random responses), only 2-way interactions were considered.

We ran a type II analysis of variance. Wald chi-square tests were used for fixed effects in linear mixed-effects models (J. Fox & Weisberg, 2018). We only considered the explanatory variables. The fixed effect represents the mean effect across all subjects after correction of variabilities. Frequentist models and statistics were performed in R® 3.4.1 using the lme4 (Bates et al., 2015) and car (J. Fox & Weisberg, 2018) packages. We only considered results of main analyses significant at  $p < .01$ .

When we found a significant main effect or interaction - and did not plan ahead for specific post-hoc analysis - Post-hoc Honest Significant Difference (HSD) post-hoc tests were systematically performed using the emmeans package (emmeans version 1.3.2). P-values were considered as significant at  $p < .05$  and were adjusted for the number of performed comparisons.

In the Results section, we reported the SEM as the estimator of the distribution dispersion of the measures of interest, when not specified.

**Table 2 | Main statistical analyses according to behavioral response types.** Experimental conditions, factors and models used as a function of the behavioral measurement. \*Response type cumulating less than 1 % of response proportion across the total sample (only 2-way interactions were considered). Detailed factor levels: CUE = informative vs. uninformative; CUELRN = left, right and neutral; Block = first, second and third. Models: ; GLMM = Generalized Linear Mixed Model.

| Response type         | Condition(s) used for response type calculation | Fixed factor(s)  |                    | Random factor        | Distribution fitting | Missing data |
|-----------------------|---|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------|
|                       |   | Between subjects | Within subjects    |                      |                      |              |
| median RT (log)       | NoDis vs. Dis1 vs. Dis2 vs. Dis3                | Age, Gender      | Cue, Distractor    | Distractor + Subject | Gaussian             | 2.3 %        |
| RT SD                 | NoDis   | Age, Gender      | Block              | Subject              | Gaussian             | 0.0 %        |
| Late responses        | NoDis   | Age, Gender      | Cue                | Subject              | Binomial             | 0.0 %        |
| Missed responses      | NoDis vs. Dis1 vs. Dis2 vs. Dis3                | Age, Gender      | Cue, Distractor    | Subject              | Binomial             | 0.0 %        |
| Cue responses *       | NoDis & Dis1 & Dis2 & Dis3                      | Age, Gender      | CueLRN             | Subject              | Binomial             | 0.0 %        |
| Distractor responses  | Dis1 & Dis2 & Dis3                              | Age, Gender      | CueLRN             | Subject              | Binomial             | 0.0 %        |
| Anticipated responses | NoDis vs. Dis1                                  | Age, Gender      | CueLRN, Distractor | Distractor + Subject | Binomial             | 0.0 %        |
| Random responses *    | NoDis & Dis1 & Dis2 & Dis3                      | Age, Gender      | CueLRN             | Subject              | Binomial             | 0.0 %        |

### **Median Reaction Times.**

To be sure to perform analyses on a sufficient number of trials per condition, participants with less than 45 NoDis trials or than 6 trials in each of the distractor conditions with positive RT were excluded from median RT analysis (leading to a total average of trials with positive RT of  $68 \pm 0.2$ ,  $19 \pm 0.2$ ,  $20 \pm 0.2$  and  $20 \pm 0.2$ , in the NoDis, Dis1, Dis2, and Dis3 conditions, respectively). Based on visual inspection of median RT distribution in distractor conditions, one outlier participant was also identified and removed from this

analysis. Revised samples for median RT analysis are: 6-year-olds:  $n = 17$ ; 7-year-olds:  $n = 20$ ). The percentage of missing data over the total sample of included subjects in analyses is shown in Table 2.

Raw RT were log-transformed at the single trial scale to be better fitted to a linear model with Gaussian family distribution.

For post-hoc analysis of the DISTRACTOR by AGE interaction on median RT, we planned to analyze two specific measures of the distractor effect: the distractor occurrence (median RT > 0 in NoDis minus median RT > 0 in Dis1) and the distractor position (median RT > 0 in Dis3 minus median RT > 0 in Dis1). Based on previous results (Bidet-Caulet et al., 2015; Masson & Bidet-Caulet, 2019), these differences can be respectively considered as good approximations of the facilitation and detrimental distraction effects triggered by distracting sounds (see Fig. S4). We first performed Shapiro tests to estimate the normality of the arousal and distraction effects. Planned non-parametric Kruskal-Wallis tests with the AGE as between-subject factor were applied to these measures when the data were not normally distributed. When the Kruskal-Wallis test revealed a significant effect of the AGE, we performed non-parametric paired Nemenyi post-hoc tests to identify developmental stages across age ranges.

Normality check and non-parametric statistics were performed in R® 3.4.1 using the stats (R Core Team, 2017) and DescTools (Signorell et al., 2019) packages.

### ***Other measures.***

RT SD were log-transformed at the single trial scale to be better fitted to a linear model with Gaussian family distribution, with the fixed factors AGE and GENDER as between-subject factor and BLOCK (3 levels) as within subject factor.

Response types were re fitted to a linear model with binomial distribution without transformation. GLMMs extend the linear mixed model to deal with non-normally distributed data. In particular, GLMMs can handle binary data. In that respect, GLMMs analysis consider a number of data points equal to the total number of trials presented during the test, in each subject.

LateRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and GENDER as between-subject factor and CUE (2 levels) as within subject factor. Only, the NoDis condition was analyzed since few participants committed LateRep in distractor conditions (total average:  $3.5 \pm 0.1\%$ ).

MissRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and GENDER as between-subject factor and CUE (2 levels) and DISTRACTOR (4 levels) as within subject factor.

CueRep and Randrep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and GENDER as between-subject factor and CUELRN (3 levels) as within subject factor. As all participants made in average less than 1 % of CueRep and RandRep, responses were considered across all DISTRACTOR levels (NoDis, Dis1, Dis2, Dis3) and their modelization was limited to two-way interactions.

DisRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and GENDER as between-subject factor and CUELRN (3 levels) as within subject factor. Responses were considered across DISTRACTOR levels (Dis1, Dis2, Dis3).

AntRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and GENDER as between-subject factor and CUELRN (3 levels) as within subject factor. Because of the important differences in the duration of the AntRep windows between distractor conditions (see Fig. S3), the GLMM was performed on the NoDis and Dis1 conditions, only (same time-frame for AntRep in these two conditions).

### ***Planned Bayesian regressions.***

To confirm a potential age effect on specific measures, Planned Bayesian Kendall regressions with age were performed on specific RT normalized measures of attention:

1. Voluntary attention orienting:  $(\text{medianRT}_{\text{NoDisUninf}} - \text{medianRT}_{\text{NoDisInf}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ ;
2. Arousal effect:  $(\text{medianRT}_{\text{NoDis}} - \text{medianRT}_{\text{Dis1}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ ;
3. Distraction effect: Voluntary attention orienting:  $(\text{medianRT}_{\text{Dis3}} - \text{medianRT}_{\text{Dis1}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ .

## 4. Results

### 4.1. Population characteristics

Using Bayesian contingency table tests, we found decisive evidence for a similar distribution in block order ( $BF_{10} = 2.1 \cdot 10^{-5}$ ), gender ( $BF_{10} = 5.2 \cdot 10^{-7}$ ) and handedness ( $BF_{10} = 8.1 \cdot 10^{-21}$ ) across age ranges. We observed – in the 6 to 17-year-olds – a decisive evidence for a similar distribution in SES ( $BF_{10} = 8.9 \cdot 10^{-20}$ ) and education level of the parents ( $BF_{10} = 1.5 \cdot 10^{-19}$ ) across age ranges.

### 4.2. Behavioral Data

We extracted 8 behavioral measures from participants' responses: median reaction times (RT), RT standard deviation (RT SD) as a measure of sustained attention, late response % (LateRep) as a measure of attentional lapses, missed response % (MissRep) and distractor response % (DisRep) as measures of distraction, cue response % (CueRep) and anticipated response % (AntRep) as measures of impulsivity, and random response % (RandRep) as a measure of motor control.

For each type of behavioral measurement, we analyzed the influence of AGE, GENDER, CUE and DISTRACTOR factors (unless specified otherwise in the Table 2). In the following, when a factor was involved in a main effect and a higher order interaction, we only specified the post-hoc analysis related to the interaction.

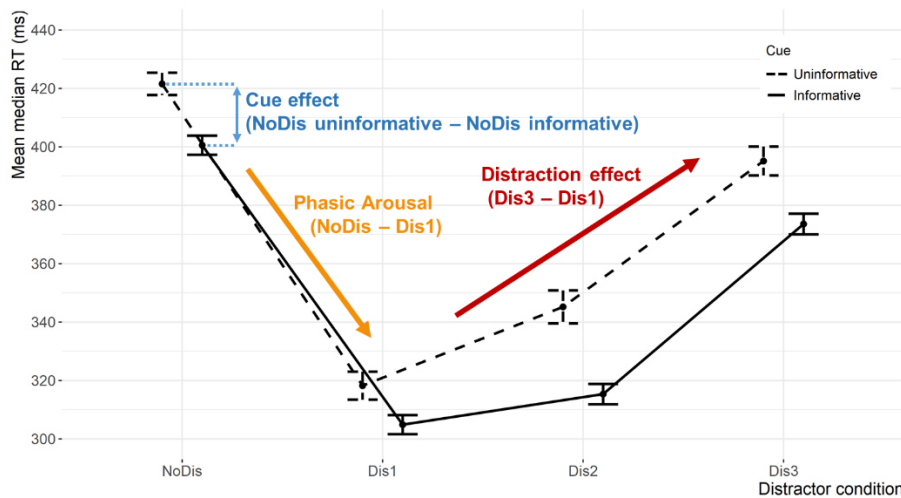
#### *i. Median RT.*

RT were modulated by GENDER ( $\chi^2 (1) = 18.1$ ;  $p < .001$ ): male ( $325.6 \pm 1.6$  ms) were faster than female ( $350.8 \pm 1.7$  ms) participants.

We observed main effects of AGE ( $\chi^2 (13) = 460.0$ ;  $p < .001$ , Fig. S5), CUE ( $\chi^2 (1) = 56.1$ ;  $p < .001$ ) and DISTRACTOR ( $\chi^2 (3) = 1326.5$ ;  $p < .001$ ). We did not observe a CUE by AGE interaction (Fig. 3a). This was confirmed by positive evidence against a correlation of the voluntary attention orienting normalized measure with age (Kendall's Tau = 0.041,  $BF_{10} = 0.1$ ).

A DISTRACTOR by CUE interaction was significant ( $\chi^2 (3) = 26.6$ ;  $p < .001$ ; Fig.2). Post-hoc HSD tests showed that participants were faster to detect targets preceded by an

informative cue in the NoDis, Dis2 and Dis3 ( $p < .001$ ) conditions, while no cue effect was found in the Dis1 condition ( $p = .694$ ).

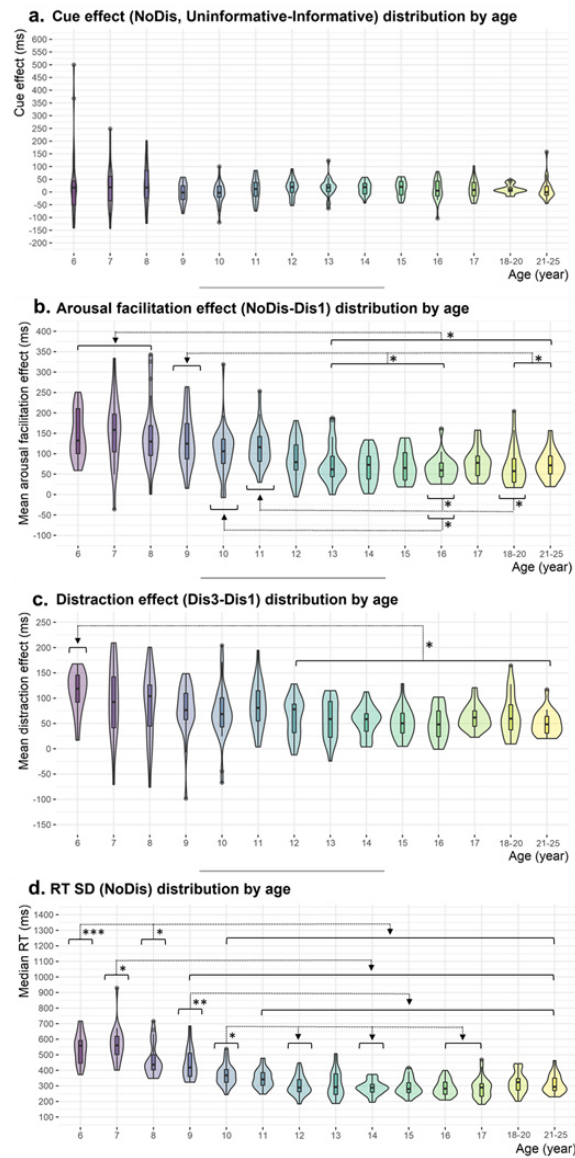


**Fig. 2 | Median RT according to cue and distractor conditions.** Mean of median reaction time as a function of the cue category [informative or uninformative] and of the distractor condition [NoDis, Dis1, Dis2, Dis3]. Significant differences and related p values can be found in the Median RT part in the Results section. (Error bars represent 1 SEM).

A DISTRACTOR by AGE interaction was significant ( $\chi^2(39) = 81.8; p < .001$ ). Planned post-hoc analyses were performed on the RT arousal facilitation and distraction effects. First, a Shapiro-Wilk test indicated that the arousal and distraction effects (see Fig. 2) were not normally distributed ( $W = 0.94; p < .001$  and  $W = 0.98; p < .001$ , respectively). Post-hoc Kruskal-Wallis tests revealed that the AGE ( $\chi^2(13) = 91.0; p < .001$ ; Fig. 3c) had a significant effect on the arousal facilitation effect: it was larger in the 6, 7 and 8-year-olds compared to the 13 to 25-year-olds ( $p < .05$ ). Other significant effects are shown in Fig 3b. This result was confirmed by decisive evidence for a negative correlation of the arousal effect normalized measure with age (Kendall's Tau = -0.141,  $BF_{10} = 132.7$ ). AGE ( $\chi^2(13) = 47.4; p < .001$ ; Fig. 3d) also had a significant effect on the distraction effect: children of 6 years of age showed higher scores than the 12 to 25-year-olds ( $p < .05$ ). This was not confirmed by Bayesian statistics: a positive evidence against a correlation of the Distraction effect normalized measure with age (Kendall's Tau = -0.044,  $BF_{10} = 0.1$ ) was found.

ii. RT SD.

RT SD was modulated by AGE ( $\chi^2(13) = 287.1; p < .001$ ; Fig. 3d). HSD post-Hoc comparisons revealed that RT SD was larger in the 6 and 8-year-olds compared to the 10 to 21-25-year-olds ( $p < .001$ ). Significant higher RT SD was also found in the 7-year-olds compared to the 9 to 25-year-olds ( $p < .05$ ), in the 9-year-olds compared to the 11 to 25-year-olds ( $p < .01$ ), and in the 10-year-olds compared to the 12, 14, 16 and 17-year-olds ( $p < .05$ ). The RT SD decreases between 8 and 12-years-old.



**Fig. 3 | RT effects according to age.** a, Reaction time differences between NoDis uninformative and informative (cue effect) as a function of the age range. b, Reaction time differences between NoDis and Dis1 (arousal effect) as a function of the age range. c, Reaction time differences between Dis3 and Dis1 (distraction effect) as a function of the age range. d, Reaction time variability (RT standard deviation across blocks) as a function of age range. ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*). Within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on left and right side.



### 4.3. Response types

The distribution of the different types of responses according to age is depicted in Fig. 4. The average correct response rate was  $76.0 \pm 0.3$  %. No main effect of AGE, nor interaction with AGE, was found for CueRep (total average:  $0.7 \pm 0.1$  %; Fig. S6a) and LateRep (total average:  $11.0 \pm 0.2$  %; Fig. S6b). Significant effects of age on the other response types are detailed in the following.

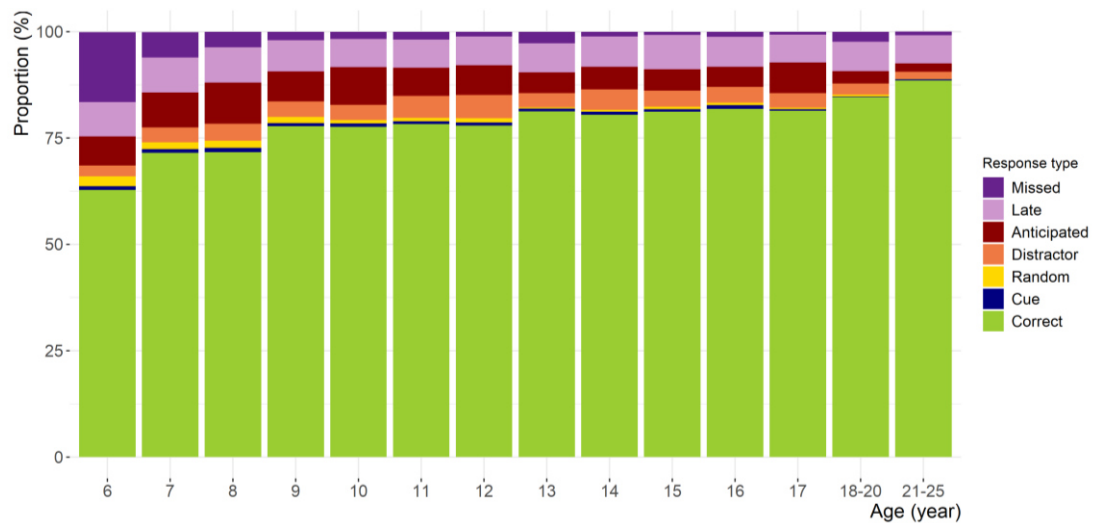
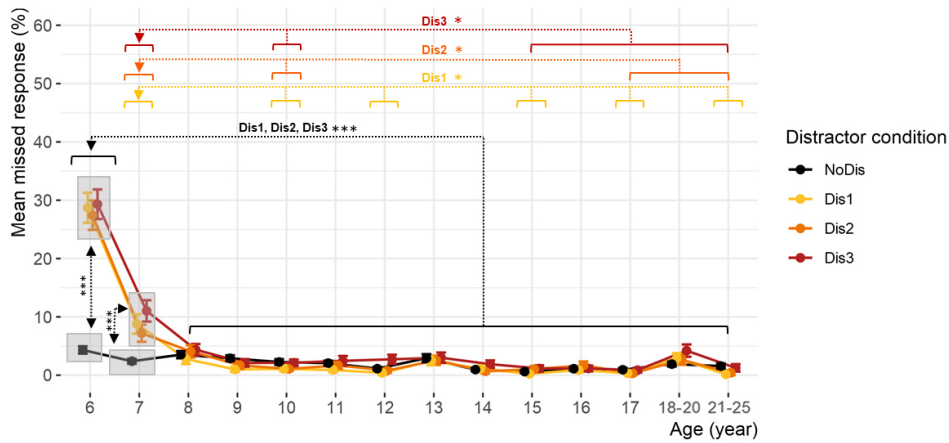


Fig. 4 | Response type proportions according to age.

#### *i. Missed responses.*

The rate of missed responses ( $3.5 \pm 0.1$  %) was modulated by AGE ( $\chi^2(13) = 96.0$ ;  $p < .001$ ) and DISTRACTOR ( $\chi^2(3) = 133.8$ ;  $p < .001$ ). A DISTRACTOR by AGE interaction was also significant ( $\chi^2(39) = 343.9$ ;  $p < .001$ , Fig. 5). HSD post-hoc tests indicated significant larger MissRep rate in the Dis conditions compared to the NoDis condition in the 6 and 7-year-olds, only ( $p < .001$ ). In the NoDis condition, HSD post-hoc comparisons indicated no significant difference in the MissRep rate with age ( $p = .124$ ). In the distractor conditions, a higher percentage of MissRep was found in the 6 to 7-year-old children ( $p < .05$ ). More precisely, the 6-year-olds had a higher MissRep rate than the 8 to 21-25-year-olds in all the distractor conditions, while the 7-year-olds presented more MissRep than (i) the 10, 12, 15, 17 and 21-25-year-olds in the Dis1 condition, (ii) the 10 and 17 to 21-25-year-olds in the Dis2 condition, and finally (iii) the 10 and 15 to 25-year-olds in the Dis3

condition. In summary, only the 6 and 7-year-olds missed target sounds preceded by a distracting sound.



**Fig. 5 | Missed responses according to age.** Mean missed responses percentage as a function of the distractor condition and the age range (error bars represent 1 SEM).

### *i. Anticipated responses.*

The rate of anticipated responses ( $10.3 \pm 0.3$  % on average) was modulated by AGE ( $\chi^2(13) = 52.9$ ;  $p < .001$ ; Fig. 6a). Post-hoc HSD analysis showed that the 7 to 12 and the 17-year-olds had more AntRep than the 21-25-year-olds ( $p < .05$ ). Children from 7, 8 and 10 years of age showed an increased AntRep rate compared to the 18-20-year-olds ( $p < .05$ ). Finally, the 10-year-olds showed a higher AntRep rate than the 13-year-old children ( $p < .05$ ).

We also observed a significant effect of GENDER ( $\chi^2(1) = 10.3$ ;  $p = .001$ ) indicating larger AntRep rate in male ( $11.7 \pm 0.4$  %) compared to female ( $8.9 \pm 0.4$  %) participants.

We observed significant main effects of CUE ( $\chi^2(1) = 18.7$ ;  $p < .001$ ) and DISTRACTOR ( $\chi^2(1) = 702.6$ ;  $p < .001$ ), as well as a significant DISTRACTOR by CUE interaction ( $\chi^2(1) = 15.3$ ;  $p < .001$ ). According to HSD post-hoc comparisons, participants made more AntRep in the Dis1 (left:  $21.2 \pm 0.9$  % / right:  $17.2 \pm 0.8$  % / neutral:  $18.3 \pm 0.8$  %) than in the NoDis (left:  $2.2 \pm 0.2$  % / right:  $2.2 \pm 0.2$  % / neutral:  $1.4 \pm 0.2$  %) condition ( $p < .001$ ), independently of the cue nature. The AntRep rate was found larger with informative cues rather than with uninformative ones in the NoDis condition (both left and right informative cues:  $p < .001$ ); while it was greater with left cues compared to right and neutral cues in the Dis1 condition (both:  $p < .001$ ).

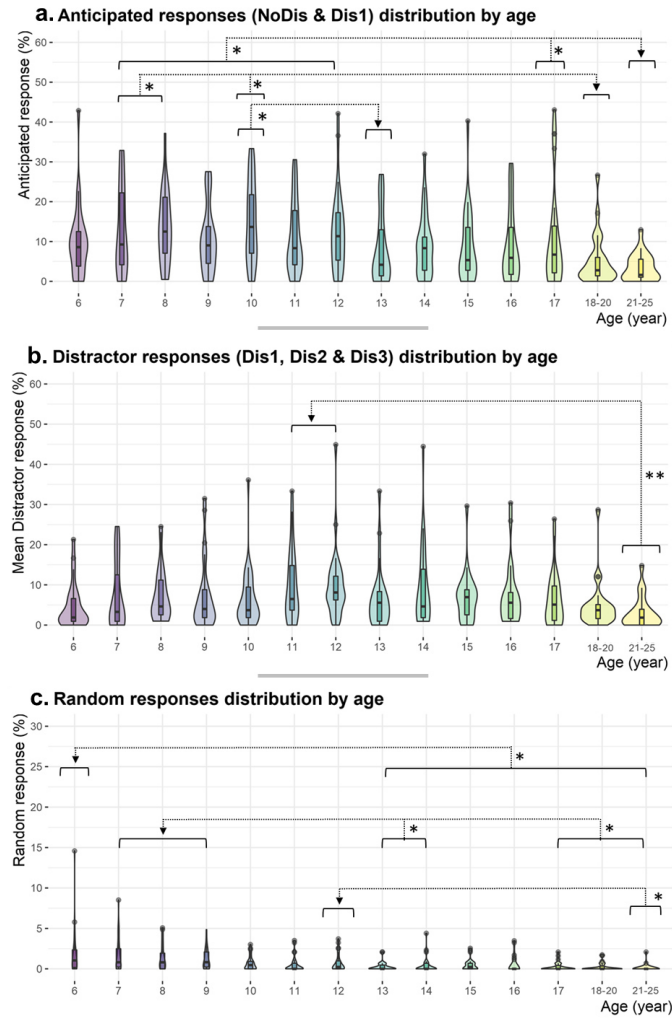
### *ii. Distractor responses.*

The rate of distractor responses ( $7.0 \pm 0.2$  % on average) was found modulated by AGE ( $\chi^2(13) = 30.8$ ;  $p = .004$ ; Fig. 6b): the 11 ( $9.7 \pm 0.8$  %) and 12 ( $10.0 \pm 0.8$  %) year-old children made more DisRep than the 21-25-year-olds ( $3.2 \pm 0.5$  %;  $p < .01$ ).

We also observed a significant main CUELRN ( $\chi^2(13) = 48.5$ ;  $p < .001$ ) effect: all participants made more Disrep in the left cue condition ( $8.8 \pm 0.3$  %) than in the right ( $7.0 \pm 0.3$  %;  $p < .001$ ) and the neutral ( $6.1 \pm 0.3$  %;  $p < .001$ ) ones.

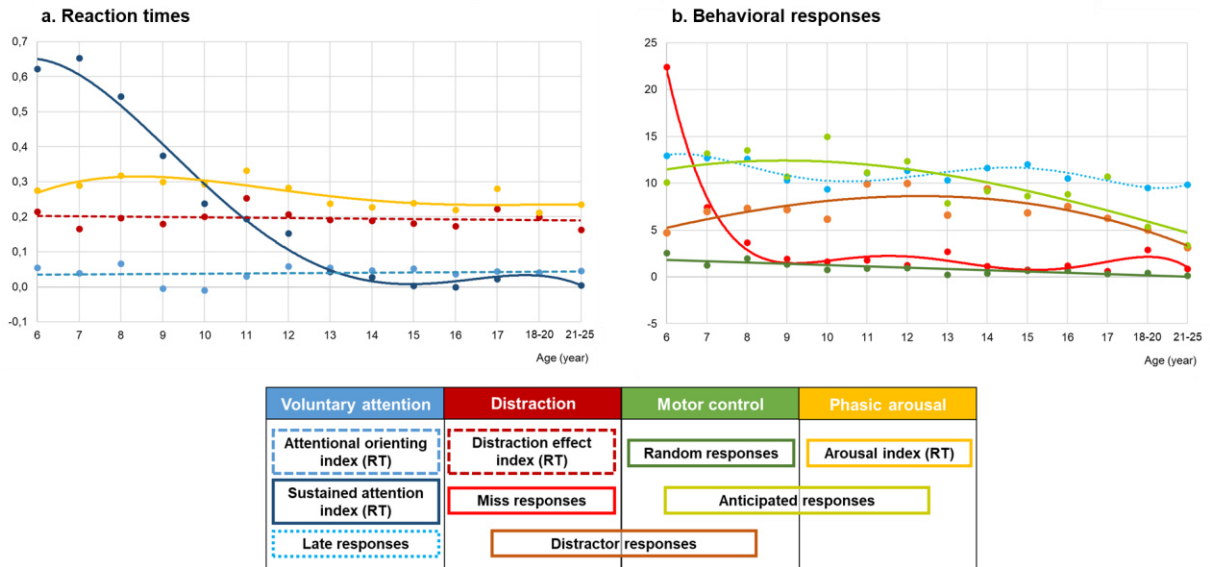
### *iii. Random responses.*

The rate of random responses ( $0.8 \pm 0.1$  % on average) was modulated by AGE ( $\chi^2(13) = 77.2$ ;  $p < .001$ ; Fig. 6c). According to HSD post-hoc comparisons, the 6-year-olds ( $2.0 \pm 0.3$  %) made more RandRep than the 13 ( $0.3 \pm 0.1$  %), 14 ( $0.5 \pm 0.2$  %), 15 ( $0.6 \pm 0.2$ ), 16 ( $0.5 \pm 0.2$ ), 17 ( $0.3 \pm 0.1$  %), 18–19 ( $0.3 \pm 0.1$  %) and 21-25 ( $0.1 \pm 0.1$ ) year-olds ( $p < .05$ ). The 7 ( $1.8 \pm 0.3$ ), 8 ( $1.4 \pm 0.2$  %) and 9 ( $1.2 \pm 0.2$ ) year-olds made more RandRep than both the 13 and 14-year-olds, and the 17 to 25-year-olds ( $p < .05$ ). Additionally, the 12-year-olds ( $0.8 \pm 0.1$ ) made more RandRep than the 21-25-year-olds ( $p < .05$ ).



**Fig. 6 | Behavioral responses according to age.** a. Anticipated responses percentage (NoDis and Dis1) as function of the age range. b. Distractor responses percentage as a function of the age range. c. Random responses percentage as a function of the age range. ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*). For b, c and d: within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on each side.

The percentage of incorrect responses decreases with age. Incorrect responses are due to distracting sounds inducing a large number of missed responses in the youngest ones (age 6 and 7) and a great amount of responses to distractors in the 11 and 12-year-olds. Moreover, the 6-9-year-olds present a higher rate of random responses and the 7-12-year-olds a greater rate of anticipated responses (see Fig. 6 for a graphical representation of the main results according to age).



**Fig. 7 | Graphical representation of the main results. a,** Reaction times normalized measures according to age. Curves correspond to polynomial fitting curves for the Sustained Attention (order 4) and Arousal (order 4) measures, and to fitting lines for the Distraction and Attention Orienting measures. Sustained attention measure = mean RT SD for each age range normalized across age ranges; Attention orienting measure =  $(\text{medianRT}_{\text{NoDisUninf}} - \text{medianRT}_{\text{NoDisInf}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ ; Arousal measure =  $(\text{medianRT}_{\text{NoDis}} - \text{medianRT}_{\text{Dis1}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ ; Distraction effect measure =  $(\text{medianRT}_{\text{Dis3}} - \text{medianRT}_{\text{Dis1}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ . **b,** Percentage of late responses (LateRep), miss responses (MissRep), responses to distractors (DisRep), anticipated responses (AntRep) and random responses (RandRep) according to age. Dots represent the mean percentage. Curves correspond to polynomial fitting curves for LateRep (order 5), MissRep (order 5) DisRep (order 3) and AntRep (order 3), and to a fitting line for RanRep. Measures reflecting (1) voluntary attention are in blue colors, (2) distraction are in red colors; (3) motor control are in green colors, and (4) arousal are in yellow color. Brown and light green colors represent processes overlaps. Dotted lines represent measures which have not been found modulated by age.

## 5. Discussion

We aimed to characterize the developmental trajectories of attentional and motor processes related to distractibility using several behavioral measures (see a graphical summary in Fig. 7). Our findings suggest that voluntary orienting of attention is mature at 6 years of age, while voluntary sustained attention slowly develops until the age of 12. Distraction is greater before the age of 8, compared to older age groups. Later in childhood and adolescence, there is increased impulsivity, which fades in adulthood.

Global scores from the ADHD-RS clearly indicate that parents report better attention capacities in older (12 to 17 years old) than in younger (6 to 10 years old) children. This result, consistent with previous findings (Petton et al., 2019), confirms an ongoing maturation of attentional processes and motor control during childhood and adolescence.

### **Are children able to voluntarily focus attention?**

Shorter reaction times to targets preceded by informative rather than uninformative cues is typically used as a measure of voluntary attention orientation towards the cued side in the informative condition (Posner, 1980, 2012). According to Bayesian correlation analysis performed in the current study, there is no evidence for an effect of age on this cue effect in the absence of distracting sounds, corroborating previous studies showing mature voluntary attention orienting at 6 years of age, or even during the first year of life (Ross-Sheehy et al., 2015; Rueda et al., 2004).

In the absence of distracting sounds, difficulties in sustained attention can result in increased RT variability and late response rate (index of attentional lapses). Increased intra-subject variability of RT reflects voluntary attentional efficiency (Antonini et al., 2013). We found that RT variability between trials with no distracting sounds during the whole experiment (around 15 min) slowly decreases between the ages of 8 and 12 corroborating an improvement in sustained attention during this period (Lin et al., 1999; Petton et al., 2019; Thillay et al., 2015). This progressive maturation of sustained attention between the ages of 8 and 12 may be related to the structural and functional maturation of the frontal lobes (Blakemore & Choudhury, 2006; Gogtay, et al., 2004), allowing a more efficient voluntary attentional control (Blakemore & Choudhury, 2006; Thillay et al., 2015). Interestingly, we did not find an increase in RT variability through the task as previously observed in adults (Flehmig et al., 2007). This absence of modulation over time could be explained by the presence of distracting sounds in 50% of the trials in the CAT, compared

to typical paradigms used to measure sustained attention such as the Continuous Performance Test (Kanaka et al., 2008; Lin et al., 1999). Distractors trigger a phasic arousal burst (Bidet-Caulet et al., 2015), which increases alertness for a few seconds (Aston-Jones & Cohen, 2005a). This could help in maintaining an appropriate general arousal level compensating the vigilance decline across the blocks. Even when selecting the trials without distractors to analyze sustained attention, phasic arousal could still have an effect, especially when the trials without distractors were preceded by a late occurrence distractor trial (Masson & Bidet-Caulet, 2019). We also found no evidence for an effect of age on the rate of late responses reflecting attentional lapses, in contrast with previous studies highlighting a global decrease in spontaneous fluctuation of attention between 8 and 12 year of age (Petton et al., 2019). Phasic arousal could also partially compensate for decreased sustained attention capacities by reducing RT variability enough to avoid attentional lapses. Therefore, the CAT seems to be valuable to measure the efficacy of sustained attention in a context with distractors.

These findings further suggest that some proactive form of attentional control is already present at the age of 6 to improve anticipation and detection of a target in accordance with previous information, but that it still needs to mature to achieve stabilized performances over time.

### **Are children too sensitive to distracting information?**

Several measures of the CAT reflect distraction (i.e. a behavioral cost). Distracting sounds can result in longer reaction times (Bidet-Caulet et al., 2015; ElShafei, Fornoni, et al., 2018; Masson & Bidet-Caulet, 2019), or worse, in missed responses to the following target (Parmentier, 2008; Parmentier & Andrés, 2010) and sometimes to responses to the distractor (van den Wildenberg & Crone, 2005). The strength of the CAT lies in the different timings of the distractor sounds before the target, enabling the dissociation of the behavioral cost and benefit they induce. In line with previous studies using the CAT in adults (Bidet-Caulet et al., 2015; ElShafei, Bouet, et al., 2018; ElShafei et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019), we observed two distinct effects on RTs triggered by the distracting sounds. First, distracting sounds played long before the target (Dis1 and Dis2) induced a reduction in reaction times compared to a condition without distractor (NoDis). This benefit in RT has been attributed to an increase in phasic arousal (Masson & Bidet-Caulet, 2019), but the contribution of a warning cue effect of the distracting sound cannot be ruled out. Second, distracting sounds played just before the target (Dis3) resulted in an

increase in reaction times compared to conditions with a distractor played earlier (Dis1 and Dis2). This cost in RT is considered as a good behavioral approximation of distraction (Bidet-Caulet et al., 2015; ElShafei et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019). Importantly, this measure of distraction using the CAT (difference in reaction time to targets preceded by the same distracting sound at different timings) is slightly different from the deviance distraction effect (difference in reaction time to targets preceded by or including a standard vs a deviant distracting event) obtained with oddball paradigms. Indeed, the CAT rather provides a measure of distraction by an unexpected isolated salient event; while oddball paradigms provide a measure of distraction triggered by deviants embedded in a regular sound sequence. In oddball paradigms, the sound sequence (including the deviants) could be inhibited by proactive selective attention mechanisms, similar to the unattended stream in a classic dichotic paradigm (Bidet-Caulet et al., 2010; Hillyard et al., 1973b). This is less likely to happen with the CAT since distractors are not embedded in a regular stream of sounds.

Both phasic arousal and distraction effects were observed between the ages of 6 and 25. The CAT thus enables the dissociation of the effects of arousal (RT NoDis – Dis1) and distraction (RT Dis3 – Dis1) on the RT in both adults and children. Importantly, the developmental trajectories of these two measures were found to be different. Distraction is increased in 6-years-old only, and progressively decreases from the age of 7 to 12, although this effect is not seen when normalizing using the median RT across all trials. Phasic arousal is stable between the ages of 6 and 9, decreases between the ages of 9 and 13 and reaches the adult developmental level at the age of 13. To our knowledge, there is no literature on the developmental trajectory of phasic arousal, but a study showing increased pupil dilation to rare complex sounds in infants compared to adults (Wetzel, Buttelmann, et al., 2016). Concerning distraction, previous developmental studies using oddball paradigms provided contradictory results regarding changes in the deviance distraction effect between children and adults. Some studies found that the deviance distraction effect decreases with age, with mature performance around the age of 10 (Wetzel et al., 2006, 2018; Wetzel, Schröger, et al., 2016; Wetzel & Schröger, 2007), while other works found no effect of age (Horváth et al., 2009; Leiva et al., 2016; Ruhnau et al., 2013; Wetzel et al., 2009). This discrepancy can result from differences in the tested age-ranges and from the dissociation between the distracting event and the target. Indeed, in audiovisual oddball paradigms, distraction effect reflects the impact of a distracting sound on the response to a visual target, while in the auditory oddball paradigms, the distracting event is a feature of the target sound to discriminate. Attentional mechanisms might be



differently activated in these two kinds of paradigm, in particular inhibitory mechanisms suppressing distractor processing might be less recruited in the auditory oddball paradigm. The final impact of distracting events on the performance of an unrelated task is contingent to the strength of the distraction effect and on the level of phasic arousal. Phasic arousal depends on the sound properties (Max et al., 2015; Parmentier & Andrés, 2010; SanMiguel, Linden, et al., 2010; Wetzell et al., 2012) and the level of tonic arousal (Aston-Jones & Cohen, 2005a; Howells et al., 2012) which are influenced by the task demands (Eysenck, 1982; Kahneman, 1973; Yerkes & Dodson, 1908). In future research, it seems important to measure levels of tonic and phasic arousal to understand the developmental trajectory of distraction. The present results suggest that phasic arousal and distraction would follow distinct developmental trajectories. However, the precise relation between the arousal and distraction effects still needs to be characterized and the CAT measures should not be conceived as makers of independent cognitive functions, but as complementary measures of the impact of distractors on performance.

The number of missed and incorrect responses in attentional tasks is a sensitive measure of distraction since it was found to negatively correlate with school performance (Zimmermann & Fimm, 2002). In the presence of distracting sounds (irrespective of their timing), we observed a large increase of missed responses only in the 6 and 7-year-old children. This detrimental distraction effect strongly decreases from the age of 6 to 7, and moderately from the age of 7 to 8. At 8-years-old, the missed response rate reaches the adult level (with or without distracting sounds). An increase in missed response rate was previously seen in children of 5 and 6 years of age in a no-distractor context (Kanaka et al., 2008). In contrast, the missed response rate was not modulated by age in the CAT no-distractor trials, suggesting that the missed responses in the 6 and 7-year-olds is caused by the deleterious effect of the distracting sound. Additionally, the 11 and 12-year-old children responded more to distractors than the 20 to 25-year-olds. This increase in responses to the distractor suggests a higher impulsivity at this age, which progressively decreases from 13 to 19 years of age. A decrease in responses to irrelevant stimuli from the ages of 3 to 16 was previously observed (Booth et al., 2003; Ridderinkhof et al., 1999; van den Wildenberg & Crone, 2005; Wright et al., 2003). Taken together, these results suggest that resistance to interference improves during childhood until late adolescence.

In the CAT, longer reaction times, target omission and responses to a distractor all indicate the predominance of the reactive form of attentional control in young children. They could result from either (i) an increased involuntary attentional capture, (ii) a reduced voluntary attentional inhibition of distracting sounds, or finally, (iii) an impossibility/difficulty

to reorient the attentional focus back to the task at hand. Until now, few studies have investigated these hypotheses. Some electroencephalographic and behavioral works suggest that the increased behavioral distraction in children results from a delayed reorientation of attention to the task at hand (Ruhnau et al., 2010; Wetzel et al., 2018). However, inconsistent results have been reported (Wetzel & Schröger, 2014) and further electro- or magnetoencephalographic studies during development will help our understanding of the brain mechanisms underlying increased distractibility.

In summary, distraction is increased in the youngest children (ages 6 and 7) reflected by a large increase of missed responses. In the 11 and 12-year-olds, enhanced distraction manifested as increased impulsivity, reflected in an increase in responses to distracting sounds. The combined use of reaction times, as well as missed and distractor response rates is necessary to assess the developmental trajectory of distraction and phasic arousal triggered by distracting sounds. This will help to fully understand the impact of distractors on behavior. Distraction is multifaceted and results in both attention and motor manifestations.

### **Beyond attention: Impulsivity and motor control in children.**

In broader models of behavioral control, the executive system coordinates the interaction of memory, attention and motor processes (Diamond, 2013; Kahneman, 1973). Motor control and attention are tightly linked: motor inhibition is driven by attentional selection, which is conditioned by past actions and their related memory traces. Difficulties in motor inhibition can result in responses to task-irrelevant events such as the distracting sounds or responses in anticipation of the targets, which can be considered as the behavioral expression of impulsivity. Many models have suggested a relation between enhanced arousal level, impulsivity and motor control (e.g., Barratt & Patton, 1983; Eysenck & Eysenck, 1985). While the development of phasic arousal is poorly documented, impulsivity and motor control were found to be enhanced and reduced, respectively, in children (Booth et al., 2003; Kanaka et al., 2008; Ridderinkhof et al., 1999; van den Wildenberg & Crone, 2005; Wright et al., 2003).

While quite variable with age, the rate of anticipated responses is relatively stable between the ages of 7 and 12 and between the ages of 13 and 17. It first decreases around 12-13 years of age, and then again around 17-18 years of age. Both an inaccurate prediction of the target time occurrence and difficulties in voluntarily maintaining motor control could account for anticipated responses. Higher anticipated response rates might

reflect an immature proactive strategy progressively developing from childhood to adulthood. Increased impulsivity in children before the age of 12 has previously been observed (Kanaka et al., 2008; Lin et al., 1999; Thomas et al., 1981). Participants made anticipated responses to the target mostly in the presence of a distractor irrespective of age, suggesting that processes triggered by distractors influence the behavioral expression of anticipated responses. These anticipatory responses following distracting sounds could be driven by the phasic increase in arousal triggered by distractors or by reduced voluntary inhibitory motor processes.

We also noticed a progressive decrease in random response rate between the ages of 10 and 12. As random response timing corresponds to a response which is believed to be independent from a stimulus, this response would be related to motor – rather than attentional – control. Our findings suggest that motor control is mature enough at the age of 13 to reach adult performance level.

## **Conclusion.**

Despite its intrinsic limitations (e.g. testing done on different experimental sites, stress and motivation levels of the participants not considered in the analyses, no measurement provided for tonic arousal, scarcity of some responses when crossing experimental conditions), this study provides critical and precise information about the developmental trajectories of several facets of distractibility from childhood to adulthood.

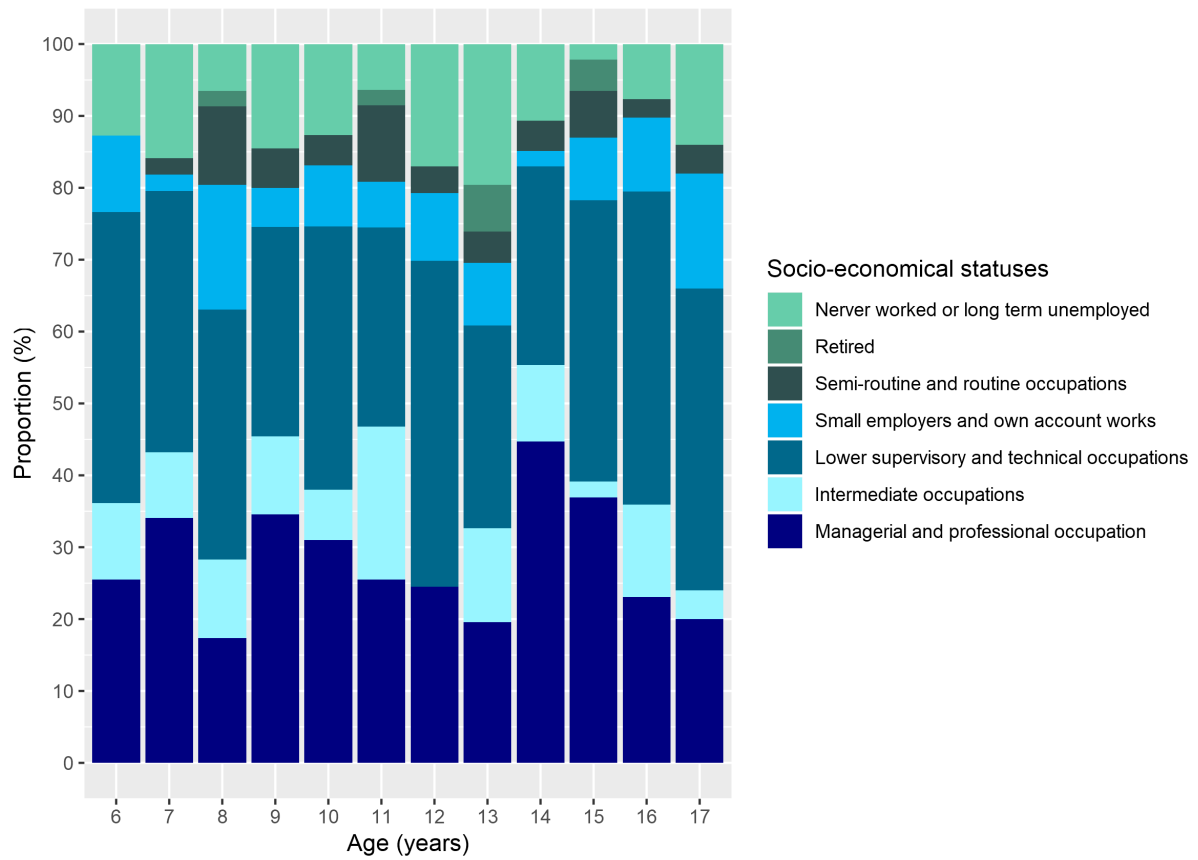
Voluntary orienting is found to be functional at 6 years of age, while sustained attention gradually develops from the ages of 8 to 12. Interestingly, distraction manifests as omissions of relevant stimuli in 6-7-year-olds, as impulsivity in 11-12-year-olds, and as delayed reaction times to relevant stimuli from 6 years of age to adulthood. These findings suggest that the attentional imbalance resulting in increased distractibility is rather related to reduced voluntary sustained attention capacities and enhanced distraction in children (6-8 years old), but to decreased motor control and increased impulsivity in teenagers (10-17 years old).

Taken together, these findings are in line with a reactive to proactive shift in attention and motor control during childhood (Blackwell & Munakata, 2014; Chevalier et al., 2014; Doebel et al., 2017; Munakata et al., 2012). Interestingly, if the reactive form is predominant during early childhood, the present results show that some proactive control is already present at 6 years of age and progressively matures until young adulthood.

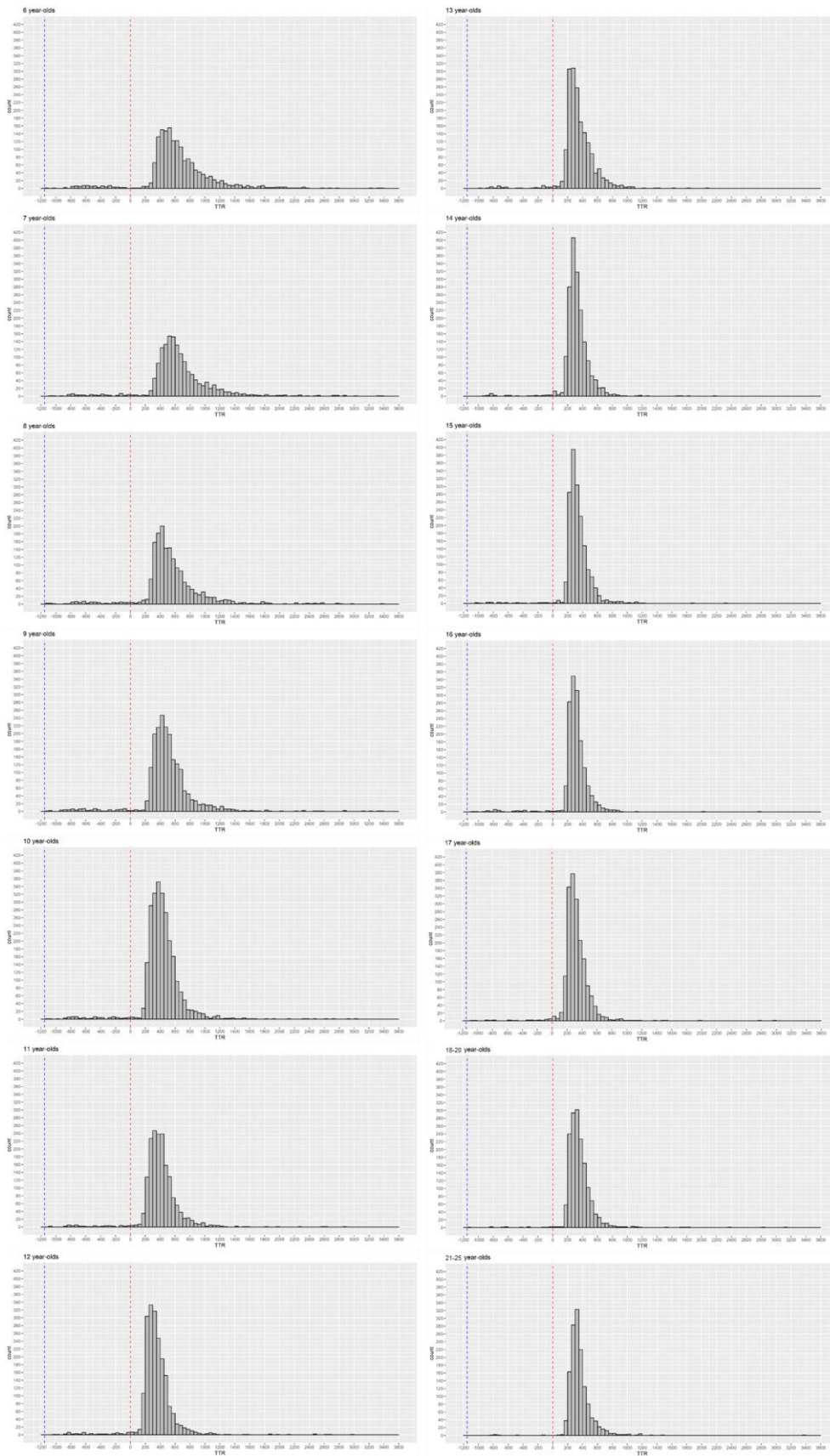
In light of the present findings, psycho-education and classroom learning strategies could be improved by targeting attention processes in children and motor control capacities in young teenagers, as of now. As few standardized neuropsychological tests are currently available to assess distractibility, assessing the validity of the measures used in the present study could help to better characterize attentional deficits and improve individualized care for patients.

## 6. Supplementary information

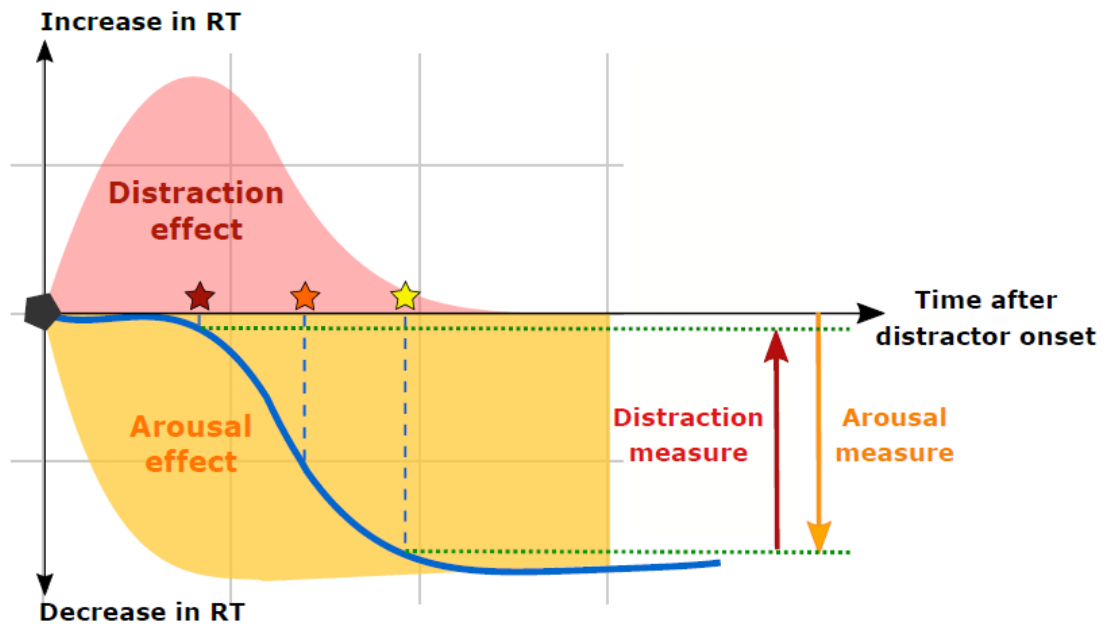
### 6.1. Supplementary figures



**Figure S1. Repartition of socio-economical statuses across the population sample.** Proportion of the parents' SES in children from 6 to 17 years old.

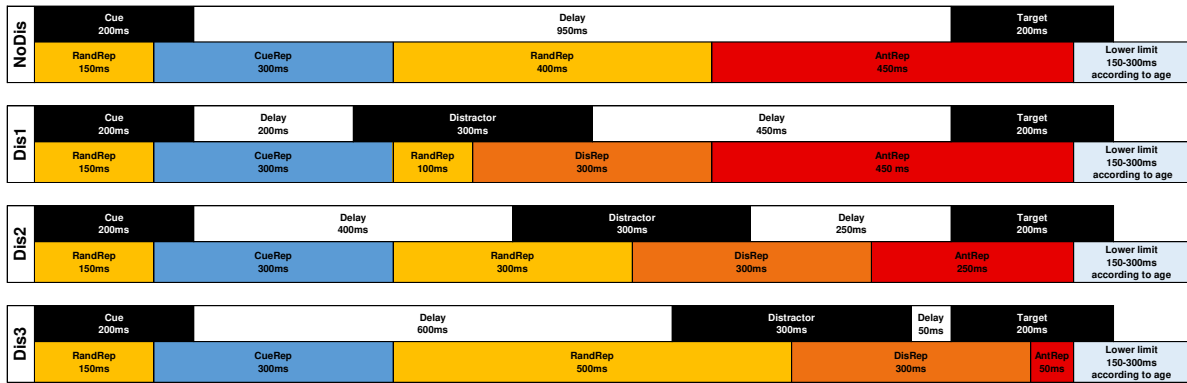


**Figure S2. Lower RT limit.** Histogram of the number of trials (y axis) according to the RT in ms (x axis) in the NoDis condition, across all participants of each age range. The blue dotted line indicates the cue onset; the red dotted line indicates the target onset; finally, the orange dotted line indicates the significant ( $p < .05$ ) threshold identified using ordered-timeline non-parametric paired Wilcoxon tests.

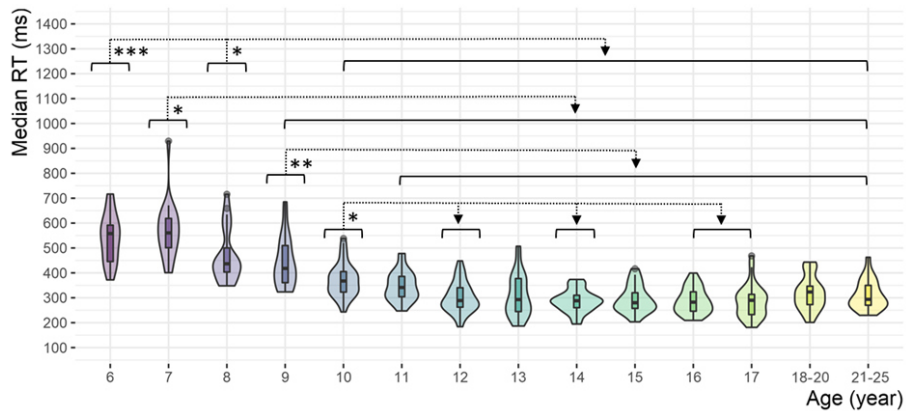


- Resulting effect on reaction time in comparison to the NoDis condition
- ◆ Distractor onset
- ★ Target onset in Dis3 condition (short distractor-target delay)
- ★ Target onset in Dis2 condition (middle distractor-target delay)
- ★ Target onset in Dis1 condition (long distractor-target delay)

**figure S3. Schematic view of the cost and benefit triggered by distracting sounds.** The effect of distracting sound on reaction time (blue line) depends on the distractor-target interval in the task design and results from the combination of the beneficial arousal and detrimental distraction effects.

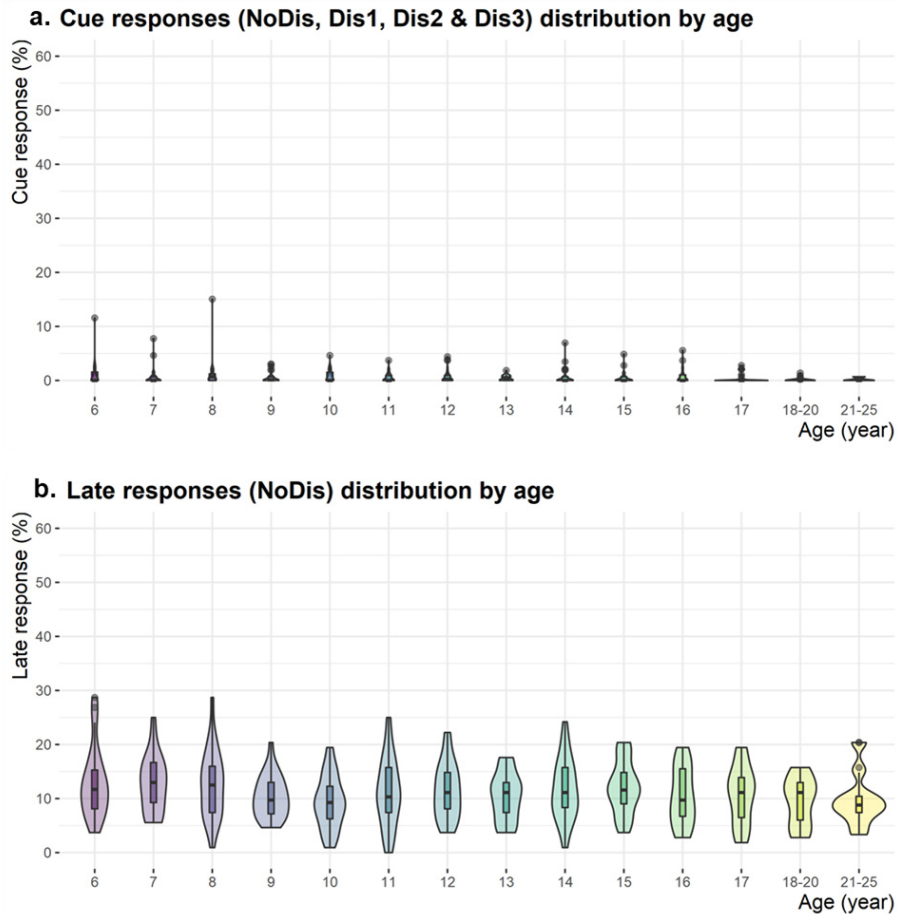


**Figure S4. Timeline for the behavioral response categorization during the CAT trials.** From top to bottom: NoDis, Dis1, Dis2 and Dis3 conditions. The superior row depicts the timing of the task related events (cue, distractor and target); the inferior row shows the category in which the behavioral response is assigned based on its timing of occurrence. CueRep: responses to cues, DisRep: Responses to distractors, AntRep: anticipated responses, and RandRep: random responses.



**Figure S5. Median RT according to the age.** Within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on left and right side. ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*).





**Figure S6. Behavioral responses according to age.** **a.** Cue responses percentage (NoDis, Dis1, Dis2 & Dis3) as function of the age range. **b.** Late responses percentage (NoDis) as a function of the age range. For **a** and **b**: within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on each side.

**Table S1. Results of Bayesian repeated-measure ANOVA on auditory thresholds.** **a.** Model Comparison. the following outputs are specified:  $P(M)$  = prior model probability,  $P(M|data)$  = posterior model probability,  $BF_M$  = change from prior to posterior model,  $BF_{10}$  = Bayes Factor against the null model. The null model includes the subjects factor. To interpret the strength of evidence in favor of the null model (uniform distribution), we considered a BF between 0.33 and 1 as weak evidence, a BF between 0.1 and 0.33 as positive evidence, a BF between 0.01 and 0.1 as strong evidence and a BF lower than 0.01 as a decisive evidence. Similarly, to interpret the strength of evidence against the null model, we considered a BF between 1 and 3 as weak evidence, a BF between 3 and 10 as positive evidence, a BF between 10 and 100 as strong evidence and a BF higher than 100 as a decisive evidence. **b.** Analysis of Effects. For two-way Bayesian repeated-measure ANOVA, the following outputs are also specified:  $P(inc)$  = prior inclusion probability,  $P(inc|data)$  = posterior inclusion probability,  $BF_{inclusion}$  = compares models that contain the effect to equivalent models stripped of the effect.

**a. Model Comparison**

| Models                     | P(M)  | P(M data) | BF <sub>M</sub> | BF <sub>10</sub> | error % |
|----------------------------|-------|-----------|-----------------|------------------|---------|
| Null model (incl. subject) | 0.200 | 0.003     | 0.013           | 1.000            |         |
| Age                        | 0.200 | 0.556     | 5.006           | 175.388          | 8.040   |
| EAR + Age                  | 0.200 | 0.354     | 2.195           | 111.802          | 4.830   |
| EAR + Age + EAR * Age      | 0.200 | 0.084     | 0.369           | 26.652           | 3.030   |
| EAR                        | 0.200 | 0.002     | 0.009           | 0.677            | 0.988   |

Note. All models include subject

**b. Analysis of Effects**

| Effects   | P(inc) | P(inc data) | BF <sub>incl</sub> |
|-----------|--------|-------------|--------------------|
| EAR       | 0.400  | 0.356       | 0.638              |
| Age       | 0.400  | 0.910       | 171.280            |
| EAR * Age | 0.200  | 0.084       | 0.238              |

## 6.2. Supplementary Information S1. Instructions

### **1. Hearing threshold**

First, we are going to measure the intensity level needed for you to hear the sounds.

You will see a white cross at the center of a black screen. This cross will be replaced by a dog facing front. After seeing the dog, you will hear it barking. When you hear the dog barking, you have to press this button (show the response button).

For the whole experience, there will only be one button to answer: it will always be this one (show the button again).

So, you will see the dog, then you will hear it barks and you will have to press the button. If you do NOT hear the dog barking after seeing it, then you should not click.

If you hear the dog but as if it was far away, you have to press the button. However, if you are really not sure that you heard it, then it is better not to answer.

Half of the test will be in your right ear and the other half in your left ear. I don't know which way it starts because it changes for everyone.

The test is going to start now. Remember: you click when you hear the dog and you don't click when you hear nothing.

### **2. Attention test**

Now, we are going to test your speed and concentration.

This time you will see a blue cross at the center of a gray screen. This cross will be replaced by a picture of a dog facing front or in side view. During the exercise, you will always need to look at the cross and images at the center of the screen.

When the dog is facing front, you will hear a dog barking either in your right or in your left ear: you cannot guess. When the dog is facing right, you will always hear a dog barking in your right ear; when the dog is facing left, you will always hear a dog barking in your left ear.

It is important to pay attention to the dog's direction because your goal is to press this button as fast as possible as soon as you hear it barking. You always have to press the same button, irrespective of whether the dog barks in the right or left ear).

Sometimes between the time you see the dog and the time you hear it barking, you will hear a kind of alarm clock or telephone ring, louder than the dog's bark. Do not click to the alarm bell, but press the button only when you hear the dog. When you hear the bell, you don't click; if after the ringing you hear the dog, then you can click. When you click at the right time, you will see a happy dog with a bone in its mouth.

It is possible that sometimes you make mistakes by clicking to the ringtone or by forgetting to respond to the dog barking. It does not matter; the important thing is to try to focus back on the exercise.

We will do 3 tests of about 3-4 minutes. At the end of each test you will see a number on the screen: this number is in fact your reaction time in milliseconds. So, the lower the number is, the faster you are.

We are now going to start with a short practice block.

### **6.3. Supplementary Information S2. RT lower limit calculation**

RT have been found to decrease with age, regardless of attention maturation. To dissociate anticipated and fast correct behavioral responses, we identified a RT lower threshold (RT lower limit) for correct responses in each age group. We computed the frequency distribution of RT of all trials of all subjects by age range with a 50 ms step (see Fig. S2). We considered the 100 to 500 ms period post target onset and performed ordered-timeline non parametric paired Wilcoxon tests for each age range to determine what lower RT threshold we should consider.

Ordered-timeline paired Wilcoxon tests on RT frequency distributions for every age range indicated that the percentage of responses became significantly larger (threshold:  $p < .05$ ) from the previous time range during the post target onset period of (i) 300-350ms in the 6 and 7-year-olds, (ii) 250-300ms in the 8-year-olds, (iii) 200-250ms in the 9 and 10-year-olds, and finally (iiii) 150-200ms in children starting from 11 years of age and adults. Therefore, the shortest reaction time for a correct response (RT lower limit) was defined as follow for the subsequent analysis in each age range: 300 ms for the 6 to 7-year-old children, 250 ms for the 8-year-olds, 200 ms for the 9 and 10-year-old children and 150 ms from 11 to 25-years-old.

#### 6.4. Supplementary Information S3. Statistical analysis of auditory thresholds

To check for any EAR difference, auditory threshold values were submitted to a Bayesian repeated-measure ANOVA with EAR as a within-subject factor and AGE as a between-participant factor.

The best model was the one including the effect of AGE ( $BF_{10} = 175.4$ ), only (see Extended Data Table. 1). There was decisive evidence for a specific effect of Age ( $BF_{inclusion} = 171.2$ ) and there was weak to positive evidence against a specific effect of EAR ( $BF_{inclusion} = 0.6$ ) and of the AGE by EAR interaction ( $BF_{inclusion} = 0.2$ ). These results argue for the absence of hearing difference between the two ears.

#### 6.5. Supplementary Information S4. Statistical analysis of attention scores

Attention scores were provided by the ADHD-RS in children and ASRS in adults with a respective maximum total score of 54 and 72. The higher the score, the greater the attention difficulties. Unfortunately, ADHD-RS scores were missing in 7.1 % of the 12-year-olds, and ASRS scores were missing in 52 % of the 18-20-year-olds and in 55 % of the 21-25-year-olds.

To compare ADHD scores according to age (6 to 17 years old), we performed a Bayesian ANOVA with AGE as a between-subject factor. Post-hoc comparisons were based on the default t-test with a Cauchy prior.

We found decisive evidence for an effect of AGE ( $BF_{10} = 2.4 \cdot 10^8$ ; see Table 1 in the main manuscript for detailed ADHD scores by age). Post-hoc analysis showed that the 6 to 10-year-olds present higher ADHD scale score than the 12 to 17-year-olds.

## ETUDE 2

---

*Please, note that this version of the manuscript  
has not yet been peer-reviewed.*

*This study has been performed as part of a 4-months PhD internship  
(granted by the IDEX Lyon and the LABEX CeLyA)  
under the supervision of Christina Karns and Erik Pakulak  
in the Brain Development Lab at the University of Oregon (Eugene, Oregon, USA).*

### 1. Title and abstract

#### **The development of attention and distractibility in preschool children from higher and lower socioeconomic status backgrounds**

Hoyer, R.S.<sup>1</sup>, Pakulak, E.<sup>2</sup>, Bidet-Caulet, A.<sup>1</sup>, Karns, C.M.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> *Brain Dynamics and Cognition Team, Lyon Neuroscience Research Center; CRNL, INSERM U1028, CNRS UMR5292, University of Lyon 1, Université de Lyon; Lyon, France.*

<sup>2</sup> *Department of Child and Youth Studies, Stockholm University; Stockholm, Sweden.*

<sup>3</sup> *Center on Brain Injuries Research and Trainings, Psychology Department, University of Oregon; Eugene, Oregon.*

Attention is a multifaceted construct supported by multiple brain networks that undergo significant development in childhood. A child's ability to select relevant information and suppress distractions is a critical skill for school success. However, the developmental trajectory of these attentional systems, and how external factors such as socio-economic status (SES) influence them, has not been adequately characterized. We used a Competitive Attention Task (CAT) to simultaneously measure voluntary attention, distraction, phasic arousal, impulsivity and motor control in 4 and 5-year-old children of higher and lower SES backgrounds (N=72). Irrespective of age and SES, distracting sounds induced a facilitation effect and increased impulsivity, which is developmentally consistent with previous studies in older children and adults (Hoyer 2019). However, 4-year-old children from lower SES backgrounds had significantly higher variability in

response times, more impulsive responses, and more missed targets than the higher SES group, indicating a reduced ability to recover from distraction, although this difference disappeared by age 5. These results indicate that the developmental timeline of multiple facets of attention contribute to distractibility, and may inform evidence-based programs to compensate for attention differences in childhood.

## 2. Introduction

In hearing children, the ability to listen to relevant auditory information and suppress distractions is a foundational skill for learning and educational achievement (Stevens & Bavelier, 2012). For example, in a typical classroom, a child may need to listen to a teacher's instructions or focus on a task when there are distractions in the environment, such as other children talking. The common term "paying attention" implies that attention is a unitary phenomenon but in fact, it is a multifaceted construct supported by multiple brain networks. These networks undergo significant and dissociated development in childhood (Posner et al., 2014; Wetzel & Schröger, 2014). The present study focuses on the development of behavioral correlates of attentional systems underlying distractibility during the preschool age. Moreover, this study aims to explore how external variable such as socio-economic status (SES) influence the developmental trajectories of attention systems.

### **Attention in Adults**

**Attention is Multifaceted.** One classic brain-based model of attention includes three components: alerting, orienting, and executive networks (Posner et al., 2014; Posner & Petersen, 1990; Posner, 1980, 2012). The alerting network is indexed by speeded response times following a general warning signal or by changes in arousal over the course of a prolonged task. It relies on brainstem and right-hemisphere systems to regulate the extent to which resources should be mobilized to react to salient events in the environment in a non-selective manner. The orienting network, which recruits frontal and parietal brain regions, supports the ability to direct attention toward a specific stimulus feature or spatial location (Corbetta & Shulman, 2002). Orienting can consist of either voluntary responses toward relevant stimuli or involuntary responses toward irrelevant stimuli (Corbetta & Shulman, 2002; Posner et al., 2014; Posner & Petersen, 1990; Posner, 1980, 2012). Finally, the executive network is implicated in target detection; this system mobilizes limited-capacity neural resources to bring stimuli to awareness (Batterink et al. 2011) and monitor conflict (Botvinick et al., 2004; Checa et al., 2014; Mansouri et al., 2017). It is thought to rely on midline anterior cingulate cortex and lateral frontal cortex (Petersen & Posner, 2012). In the context of a cognitively demanding task, ideally, these systems allow a person to focus attention on the task without being constantly distracted.

Although dissociable, these major systems work together to meet endogenous task demands and to respond exogenously to the environment. For example, voluntary attention selects relevant features (Corbetta & Shulman, 2002), locations (Posner, 1980), or modalities (Karns et al. 2009) and inhibits irrelevant ones (Broadbent, 1958; Deutsch & Deutsch, 1963; Posner, 1980; Treisman & Riley, 1969). In contrast, involuntary attention can be captured by unexpected salient stimuli, leading to distraction when the stimulus is irrelevant in the task context (Bidet-Caulet et al., 2015; Escera, Alho, et al., 2000; Näätänen, 1992). Moreover, neural responses to voluntary attention are modulated by arousal (Keil et al., 2003). Task performance is monitored by the executive system, for example by detecting when involuntary attention is captured by unexpected salient stimuli (Escera, Alho, et al., 2000; Schröger & Wolff, 1998; Wetzell et al., 2012; Wetzell & Schröger, 2014).

**Distractibility.** The term ‘distractibility’ has been used to describe the state in which an isolated, unexpected, and task-irrelevant stimulus disturbs the voluntary attention mechanisms necessary for ongoing task performance (Bidet-Caulet et al., 2015; ElShafei et al., 2019; ElShafei, Fornoni, et al., 2018; Hoyer et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019). Meanwhile, voluntary mechanisms modulate involuntary processes of attentional capture (ElShafei et al., 2019; ElShafei, Fornoni, et al., 2018). ‘Distractibility’ is thus a result of the balance between voluntary and involuntary orienting, and is influenced by overall level of alertness. Whether involuntary capture of attention is beneficial or not depends on the context. In contrast to the focused state required for a challenging task, during a less demanding task, attention is available to respond to irrelevant instead of relevant stimuli. During everyday life, many basic tasks place few demands on executive attention (e.g., walking in the street toward a specific destination, listening to music while driving, or pouring a cup of coffee). In such situations, where extensive cognitive resources are not required, it could be more advantageous to direct resources to respond to salient environmental stimuli such as potential dangers or opportunities for reward.

‘Distraction’, distinct from distractibility, is a term used to describe the cognitive and behavioral impacts of a distractor on ongoing performance. When unexpected irrelevant salient stimuli induce distraction during a task, this reactive allocation of attention and resources toward the irrelevant event is followed by a reallocation of resources toward the task: altogether, these processes result in a behavioral cost (Bidet-Caulet et al., 2015; Escera, Alho, et al., 2000; Näätänen, 1992). But distractors may also trigger a burst of phasic (i.e. transient) arousal with behavioral benefits for some tasks (Bidet-Caulet et al.,



2015; Masson & Bidet-Caulet, 2019; Max et al., 2015; Näätänen, 1992; Wetzel et al., 2012, SanMiguel et al., 2010). This burst of arousal seems to be mediated by the norepinephrine system and to result in a transient and non-specific state of readiness to respond to any upcoming stimulus (Aston-Jones & Cohen, 2005; Corbetta et al., 2008).

Distracting sounds thus generate a combination of facilitation and distraction effects, the final impact of which on performance depends on task demands (Kahneman, 1973; SanMiguel, Linden, et al., 2010; Yerkes & Dodson, 1908), sound properties (Parmentier & Andrés, 2010; SanMiguel, Linden, et al., 2010; Wetzel et al., 2012), and the sound-target delay (Bidet-Caulet et al., 2015; Masson & Bidet-Caulet, 2019; Parmentier & Andrés, 2010). The increase in reactivity induced by distracting sounds can also lead to an increased false alarm rate (Aston-Jones & Cohen, 2005; Duncan et al., 2016). This phenomenon is related to impulsivity, which is the tendency to act without forethought (Barratt & Patton, 1983; Stanford et al., 2009): an increased false alarm rate is indeed typically observed in impulsive people and might ensue from enhanced phasic arousal effect (Eysenck & Eysenck, 1985; Houston & Stanford, 2001; Zhang et al., 2015) coupled – or not – with reduced motor control (Booth et al., 2003; Kanaka et al., 2008; van den Wildenberg & Crone, 2005; Wright et al., 2003).

**Sustained attention.** Because attentional systems depend on limited attentional resources, the ability to maintain attention on selected stimuli over time has also been examined. Sustained attention is defined as the ability to maintain an active attentional engagement over time on a given task (Betts et al., 2006; Graziano et al., 2011; Oken et al., 2006; Parasuraman et al., 1989; Riccio et al., 1994). In adults, sustained attention varies over multiple time scales from rapid (across milliseconds) to slow (e.g., over a day) variations (Helfrich et al., 2018; Landau & Fries, 2012), and these temporal modulations have been related to structural aspects of ongoing neural activity (Clayton et al., 2015; Palva et al., 2013; Petton et al., 2018). Several models have been proposed to explain attentional fluctuations over time (reviewed in: Esterman & Rothlein, 2019). One, the cognitive control theory, postulates that mind wandering is a default state to inhibit for individuals; this would lead attentional resources to be first allocated to this inhibition process, at the expense of ongoing behavioral performance, and could explain shorter-term variation in sustained attention efficiency. Another theory associates tonic arousal and attentional modulations (Lenartowicz et al., 2013; Unsworth & Robison, 2017), speculating that a decrease in sustained attention efficiency would ensue from fluctuations in arousal burst intensity over longer time periods (i.e., several minutes).

## **Attention in Children**

Multifaceted attention in children. There is a common understanding that preschool children are highly distractible. Compared to adults, children's attentional capacities are more sensitive to irrelevant auditory interference from the local environment (Hoyer et al., 2019; Wetzel et al., 2006; Wetzel, Schröger, et al., 2016; Wetzel & Schröger, 2014). It is known that frontal lobe systems display a prolonged developmental time course (Gogtay, et al., 2004; Toga et al., 2006), so it is unsurprising that the immature executive system results in poorer conflict monitoring and control during childhood (Best & Miller, 2010; Blakemore & Choudhury, 2006). But given that attention relies on multiple systems in adults, the mechanisms underlying this immature attentional balance during early childhood still remains undefined. For example, poor performance during childhood could ensue from an immature voluntary orienting subsystem (Mezzacappa, 2004; Reis Lellis et al., 2013) leading to difficulties sustaining attention (Betts et al., 2006; Kanaka et al., 2008; Lin et al., 1999; Thillay et al., 2015) or inhibiting distractors (Booth et al., 2003; Howard et al., 2014), or from an immature involuntary orienting subsystem responding more strongly to irrelevant events (Wetzel et al., 2006, 2018; Wetzel, Schröger, et al., 2016; Wetzel & Schröger, 2007). Another possibility is that protracted maturation of the alerting system leads to general over or under-arousal (Hernes et al., 2002; Lansink & Richards, 1997; Wetzel et al., 2015). To resolve these questions, the different components contributing to distractibility need to be simultaneously assessed in individual children.

Voluntary and involuntary attention toward relevant objects appear to follow different maturational profiles during development (Farrant & Uddin, 2015; Posner et al., 2014), but the precise developmental trajectory remains unclear. Different paradigms with endogenous cues that are either informative or uninformative have been used to measure the behavioral effect of voluntary orienting in anticipation of a target. Results are conflicting: some studies suggest that the capacity to voluntarily orient attention is mature before the age of 4 (Colombo, 2001; Johnson et al., 1991; Ross-Sheehy et al., 2015) while others show that the benefit in reaction time (RT) to targets following informative cues increases from 4 to 6 years of age (Hrabok et al., 2007; Mezzacappa, 2004; Posner et al., 2014; Rothbart et al., 2011). On the other hand, studies investigating involuntary orienting suggest that the RT benefit following exogenous informative cues is still maturing between 6 and 9 years of age (Wainwright & Bryson, 2002) and reaches a developmental plateau between 10 and 13 years of age (Lundwall et al., 2018).

In line with Posner and colleagues' conceptual framework, the majority of developmental studies of attention have investigated the development of voluntary and involuntary orienting toward a relevant event (i.e., exogenous cues), while fewer studies examined the development of involuntary orienting toward irrelevant events (i.e., exogenous distractors). Some studies of selective spatial attention, which refers to the ability to facilitate the processing of a relevant channel of information while simultaneously inhibiting an irrelevant one, have suggested that involuntary orienting toward irrelevant stimuli may rely on different functional brain mechanisms in children and adults (Coch et al., 2005; Karns et al., 2015). Using a passive dichotic listening task with identical probes presented in attended and unattended streams, these studies have investigated the brain response to isolated and irrelevant events toward isolated and irrelevant events, while cognitive resources are recruited to inhibit a constant stream of irrelevant information. Theoretically, this paradigm invokes both voluntary and involuntary attention and can help to understand the brain correlates of distractibility. However, passive dichotic listening tasks do not provide behavioral measurements of the different attentional facets contributing to distractibility.

**Distraction in children.** The behavioral effects of involuntary orienting toward irrelevant events is typically investigated using audio-visual oddball paradigms, involving the discrimination of targets preceded by task-irrelevant standard or novel sounds in school-aged children (Wetzel & Schröger, 2014) and adults (Escera, Alho, et al., 2000; Wetzel et al., 2012). Distraction induced by irrelevant salient stimuli is measured by lower hit rates and longer reaction times to targets preceded by novel sounds. These measures improve from school age to adulthood (Olesen et al., 2007; Wetzel et al., 2006; Wetzel & Schröger, 2007), suggesting a reduction in distractibility with age. To our knowledge, only one study has investigated the distraction effect on behavioral performance in preschool-aged children using an audio-visual oddball task, and results suggest that the deleterious effect of distraction progressively decreases during the preschool period, with a critical developmental step at age four and five (Wetzel et al., 2018). In adults, studies which used the CAT paradigm have indicated that distractors can induce a deleterious distraction effect as well as a facilitation effect driven by phasic arousal.

To date no study has investigated the developmental trajectory during the preschool years of the behavioral facilitation effect induced by distracting sounds. Phasic arousal has been mostly studied according to the Aston-Jones theoretical framework (Aston-Jones & Cohen, 2005a), using physiological measurements as electrodermal activity, heart rate, or

pupil dilation, during passive tasks in infants. An increase in electrodermal response to auditory stimulation has been observed in infants from the first day to the first year of life, suggesting a progressive increase in phasic arousal during this developmental period (Hernes et al., 2002). In the same way, the heart rate of children from 6 to 12-months has been found to rise in a distraction context (Lansink & Richards, 1997), and an increased pupil dilation to rare complex sounds was also observed in infants compared to adults (Wetzel et al., 2015). Unexpected sounds similar to the distractor sounds used in the present study (phone rings) trigger an increase in pupil diameter both in children from 13 to 16 months and in young adults (Max et al., 2015).

**Sustained attention in children.** In preschool-aged children, sustained attention is commonly investigated using looking paradigms (Brandes-Aitken et al., 2019), (Reynolds & Romano, 2016; Richards & Casey, 1991) and adaptations of the Continuous Performance Test (CPT) (Conners, 2001; Mahone et al., 2001). Taken together, results from these studies suggest that sustained attention emerges within the first years of life and continues to develop through adolescence (Brandes-Aitken et al., 2019; Hoyer et al., 2019; Kanaka et al., 2008; Reynolds & Romano, 2016; Thillay et al., 2015). Differences in sustained attention efficiency between 3 and 5 years of age may result from an improvement in mobilizing attentional resources through alerting (Reynolds & Romano, 2016; Richards & Casey, 1991) and maintaining the focus on relevant information (Graziano et al., 2011; Ruff & Capozzoli, 2003). Behaviorally, these developmental changes in attention are demonstrated with a progressive reduction of false alarm and missed response rates, as well as in RT variability, during detection tasks (Mahone et al., 2001). Few studies have investigated the impact of isolated distracting events on sustained attention ability; the small number of available studies suggests that efficient sustained attention abilities in children shield against deleterious effect of distraction (Oakes & Tellinghuisen, 1994; Slobodin et al., 2015).

### **The Competitive Attention Test (CAT)**

The CAT is a paradigm designed to assess the behavioral and brain correlates of distractibility (Bidet-Caulet et al., 2015). The advantage of this paradigm is that it combines the Posner task and oddball paradigm principles to provide simultaneous and dissociated measures of voluntary attention, distraction, phasic arousal, impulsivity and motor control

in children and adults (Hoyer et al., 2019). To assess voluntary attention orienting, the CAT includes informative and uninformative visual cues toward the spatial location of a forthcoming auditory target. To measure distraction, the CAT includes trials with a task-irrelevant distracting sound preceding the target at several different delays. This change in distractor timing onset allows dissociation of the behavioral effects of facilitating phasic arousal (the difference between median RT in no-distractor and early-distractor conditions) and detrimental distraction (the difference between median RT in late- and early- distractor conditions). Based on previous results (Bidet-Caulet et al., 2015; Masson & Bidet-Caulet, 2019), these differences can be interpreted respectively as good approximations of the facilitation and detrimental distraction effects triggered by so called distracting sounds (see Fig. A1 Appendix A). Results from studies of adults typically show that the voluntary orienting effect is manifested by a RT reduction in informative compared to uninformative trials, the distraction effect is manifested by increased RT in late compared to early-distractor condition, and finally the phasic arousal effect is indexed by a RT reduction in early distractor condition compared to no distractor condition.

In order to study the development of these facets of attention with more precision, the CAT was recently adapted for young children and used in a study of a large cohort of participants aged 6 to 25 years (Hoyer et al., 2019). In this study, the behavioral measurement parameters of the CAT were refined compared to previous in adults: RT variability and different type of erroneous responses can indeed be used as markers of attentional facets contributing to distractibility (see Table 2, Method section for a detailed presentation). Erroneous response types are particularly relevant markers to study the interaction between motor and attention systems, as this interaction is believed to underlie impulsivity and motor control.

In broader models of behavioral control, motor and attention systems are tightly linked: motor inhibition is driven by attentional selection, which is conditioned by past actions and their related memory traces (Diamond, 2013; Kahneman, 1973). Difficulties in motor inhibition can result in random motor responses, while impulsivity, which is the tendency to act without forethought, results in responses to task-irrelevant events such as distracting sounds or responses in anticipation of the targets. At the level of the brain, sensory and motor areas are typically the first to mature in late infancy and the preschool period (Casey et al., 2005) with structural changes in the sensorimotor cortex which reach an adult-like functioning between late infancy and the pre-school period. However, motor control is dependent on many interconnections between cortical and sub-cortical regions of the brain (e.g., the prefrontal and lateral temporal cortices) which do not appear to reach a complete

level of maturity until adolescence (Gogtay et al., 2004). To that extent, motor control and impulsivity are likely to influence the motor response, which can in turn lead children to react randomly.

Altogether, results from the aforementioned developmental study (Hoyer et al., 2019) showed that voluntary orienting is functional at 6 years of age, while the ability to sustain attention gradually develops from 8 to 12 years of age; interestingly, distraction is manifested as omissions (i.e., missed targets) of relevant stimuli in 6-7-year-olds and as impulsivity in 11-12-year-olds. However, the RT distraction measurement was not modulated by the age, while the RT facilitation effect linked to arousal is enhanced in 6-9-year-olds. The attentional imbalance resulting in increased distractibility in children may then be more related to reduced sustained attention capacities and enhanced distraction in younger children (6-8-year-olds), increased arousal effects in childhood (6-8-year-olds), but to decreased motor control and increased impulsivity in older children and adolescents (10-17-year-olds). Although this study reported an interesting pattern of behavioral results regarding the developmental trajectory of several facets of attention that contribute to distractibility, some measurements (e.g., missed responses, RT variability) show higher variability in younger children. It has been suggested that a part of this variability may lie in environmental factors such as socioeconomic status.

### **Socioeconomic Status**

Socioeconomic status (SES) is a proxy variable for variability in the early environment, typically assessed by a combination of parental education, occupational status, and/or household income. Disparities as a function of SES have been documented in a wide range of neurocognitive outcomes, and one of the neurocognitive systems most consistently associated with SES is self-regulation, including specific aspects of attention (e.g., Pakulak et al., 2018; Ursache & Noble, 2016). While research is ongoing regarding specific aspects of the environment associated with SES that contribute to these findings at multiple levels of analysis (McEwen & McEwen, 2017), evidence suggests that one predominant mechanism is chronic exposure to stress. Chronic stress may be particularly related to differences in regulatory development via the prefrontal cortex (McEwen & Gianaros, 2010; McEwen & McEwen, 2017).

Altered functioning of executive attention systems has been linked to reduced voluntary attention abilities (Diamond, 2013; Posner, 1980, 2012), and has been consistently

reported in children and adolescents from lower SES backgrounds (Farah, 2017; Farah et al., 2006; Noble et al., 2013). Event-related brain potential studies have also found differences in selective attention as a function of SES in adolescents (D'Angiulli et al., 2008; Hampton Wray et al., 2017; Stevens et al., 2009) and in preschool-aged children (Giuliano et al., 2018; Hampton Wray et al., 2017; Stevens et al., 2009). These studies with young children have found that children from lower SES backgrounds show an increased neural response to stimuli they are instructed to ignore relative to children from higher SES backgrounds. Moreover, the relationship between SES and increased neural response to distracting sounds is mediated by heightened sympathetic nervous system arousal, which suggests that there may be a biological cost to better cognitive performance, in this case better distractor suppression, for children from lower SES backgrounds (Giuliano et al., 2018). In addition, numerous studies have reported higher anxiety in children from lower compared higher SES backgrounds (Ochi et al., 2014; Reiss et al., 2019; Zhu et al., 2019) which has been linked to increased arousal (Janelle, 2002).

The effects of socioeconomic inequality begin early and persist. For example, behavioral signs of impulsivity in the first year of life persist into first grade only in children from lower SES backgrounds (Meade, 1981); in this population, impulsivity in adolescence has also been linked to increased risk taking in early adulthood (Auger et al., 2010). Importantly, this pattern of results may represent a functional adaptation to environmental demands (e.g., increased sensitivity to potential threats) that may have deleterious effects in other environments (e.g., a classroom). In addition, these systems are amenable to evidence-based interventions targeting family stress as well as self-regulation and attention in preschool-aged children (Neville et al., 2013). In order to inform the refinement of such approaches and the development of novel approaches, it is crucial to improve our understanding of specific aspects of attention that contribute to distractibility in preschool-aged children from different SES backgrounds.

### **The Current Study**

As the development of distractibility during the preschool years is still an open question, the primary goal of the present study is to use the CAT task to characterize the simultaneous maturation of multiple aspects of attention in children from 3 to 5-years of age from lower and higher SES backgrounds. Specifically, we examine the development of voluntary orienting and sustained attention, distraction, phasic arousal, impulsivity, and

motor control, as well as potential differences in this development as a function of SES. Building on previous results in 6-year-olds (Hoyer et al., 2019) we hypothesized that (i) voluntary orienting, sustained attention and motor control abilities would progressively increase with age, while in contrast (ii) distraction, phasic arousal, and impulsivity would gradually decrease. More specifically, we expected younger children to present stronger behavioral manifestations of distractibility: an increased rate of responses to distractors and late and missed responses to targets following a distractor. We expected better voluntary attention performances (e.g., reduced RT variability, reduced late response and false alarm rates and larger cue effect on RTs in trials with no distractor) in older preschoolers. Additionally, we expected that children from lower SES backgrounds would show differences in attentional development; more specifically, a delayed development of voluntary attention functions and increased arousal effect in response to irrelevant sounds. In summary, we expected that distraction would decrease during early childhood, followed by an improvement in motor control, and a maturation of voluntary orienting and sustained attention, with a less mature profile in lower SES children.



## 3. Methods

### 3.1. Participants

Preschool children aged 3 to 5 years participated at their usual childcare site. All children had normal or corrected-to-normal vision. Parents were recruited and provided signed informed consent on-site and children provided informed verbal assent prior to participation. With their permission, parents at each site were entered to win a \$50 gift card in a lottery regardless of whether they opted for their child to participate in the study. Children chose a small educational toy as a prize for participating in the study. Sites were associated with a university campus or were Head Start preschool sites (a U.S. program serving families living at or below the poverty lines). Recruitment and study procedures were approved by the University of Oregon's Research Compliance Services and by participating schools.

Table 1 summarizes characteristics of the final sample. Although we tested 3-year-old children, experimenter field notes and visual inspection of the data indicated that the youngest children were not reliably completing the task so they were excluded from further analysis (N=14). Data from an additional 21 children were excluded because of non-compliance with instructions. A total of 71 subjects (51% female, 4-to-5-years of age) were included in the analysis. The recruitment site was used as a proxy measure to categorize children as lower and higher SES, since Head Start families must meet eligibility criteria related to economically disadvantage in order to be eligible for the program.

**Table 1 | Characteristics of the population sample.** Detailed samples by age (years and months), gender and SES.

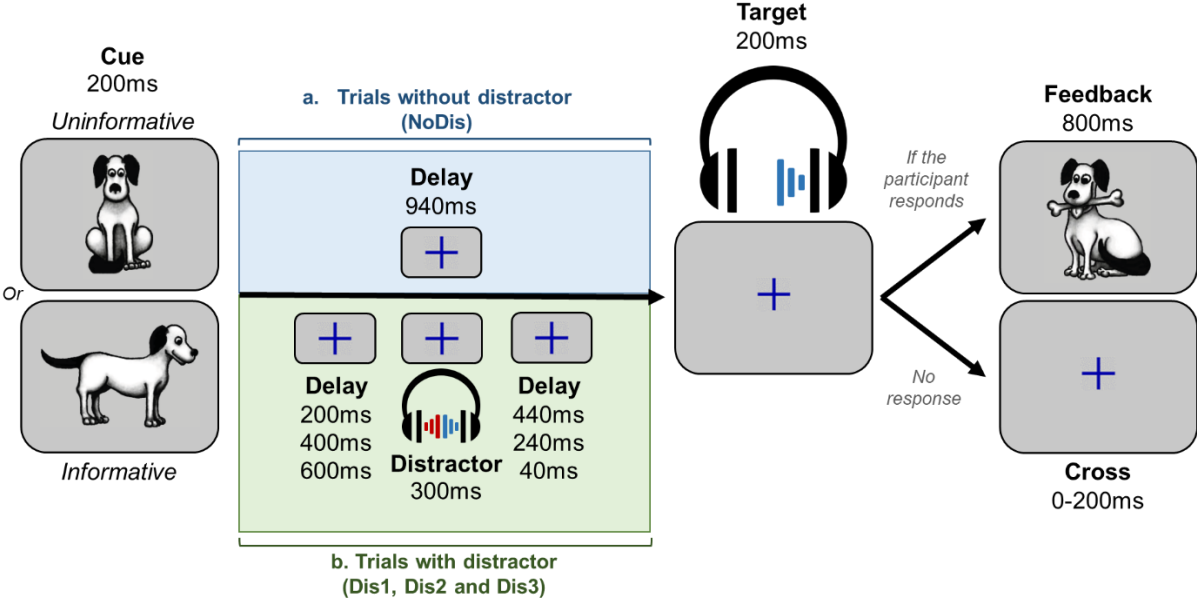
| Age                   |                                  | Sample          | Gender        |             | SES          |               |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| <i>Range in years</i> | <i>Mean age in months</i>        | <i>Included</i> | <i>Female</i> | <i>Male</i> | <i>Lower</i> | <i>Higher</i> |
| 4 to 4.9              | 53.1<br>(min = 48.0; max = 58.0) | n = 26          | 53.8%         | 46.2%       | 50%          | 50%           |
| 5 to 5.9              | 64.2<br>(min = 60.0; max = 71.0) | n = 45          | 48.9%         | 51.1%       | 66.6%        | 34.4%         |

### 3.2. Stimuli and task

A blue fixation cross was presented at the center of a laptop screen. Participants were instructed to keep their eyes fixated on the cross during the task intervals between trial events. In 50% of the trials, a visual cue (200-ms duration) was followed, after a 950-ms delay, by a 200-ms duration target sound (Fig. 1a). The visual cue was presented centrally on a screen with a grey background and could either be a dog facing left, right, or to the front. The target sound was a recording of a dog barking monaurally presented in headphones. For the other 50% of the trials, the trial structure was identical, but a binaural distracting sound (300-ms duration) was played during the 950 ms delay period (Fig. 1b). A total of 18 different distracting sounds were used (phone ring, clock-alarm, etc.) for each participant. The distracting sound could be played at three different times during the delay: 200 ms (Dis1), 400 ms (Dis2) and 600 ms (Dis3) after cue offset, distributed equiprobably. Each distracting sound was played 4 times during the whole experiment, but no more than twice during each single block to limit habituation. All sounds were played at a comfortable level with distracting sounds louder than target sounds: target sounds played at 75 dBA and Distracting sounds at 85 dBA. To compare behavioral responses to acoustically matched sounds, the same distracting sounds were played for each distractor condition (Dis1, Dis2 or Dis3) in the informative condition.

The proportion of cue categories (informative, uninformative) and target categories (NoDis, Dis) were distributed equiprobably between trials with and without distracting sounds. The informative condition represented 75% of the trials: in that case the dog was facing left or right, indicating the ear of the target sound presentation (37.5% left and 37.5% right). The uninformative condition represented 25% of the trials: the facing-front dog was followed by the target sound in the left (12.5%) or right (12.5%) ear. Participants were instructed to perform a detection task by pressing a key as fast as possible when they heard the target sound (dog bark). They were asked to focus their attention to the cued side (for example, this was conveyed as followed to children: “But when the dog is looking to the right, he’s telling you that he’ll soon bark in your right ear. When he’s looking to the left, he’s telling you that he’ll soon bark in your left ear”, see Appendix B for complete instructions). Participants were informed that informative cues were 100% predictive and that a distracting sound would sometimes be played. Feedback was given when participants correctly detected the target within 3300 ms after the target onset; a picture of a dog holding a bone (800-ms duration) was presented 500 ms after the response followed by the fixation cross for a randomized period of 1700 ms to 1900 ms. If the participant did

not respond in time, the fixation cross was displayed on the screen for an additional randomized delay of 100 ms to 300 ms.



**Fig. 1 | Protocol.** **a.** In uninformative trials, a facing-front dog was used as visual cue (200 ms duration), indicating that the target sound would be played in either the left or right ear. In informative trials, a dog visual cue facing left or right (200 ms duration) indicated in which ear (left or right, respectively) the target sound will be played (200 ms duration) after a delay (940 ms). If the participant gave a correct answer, a feedback (800ms duration) was displayed. **b.** In trials with distractor the task was similar, but a binaural distracting sound (300 ms duration) - such as a phone ring - was played during the delay between cue and target. The distracting sound could equiprobably onset at three different times: 200 ms, 400 ms, or 600 ms after the cue offset.

### 3.3. Procedure

Participants were tested in groups of two in a quiet room. Prior to the task, children were shown a treasure map containing four islands surrounded by the sea (see Fig. A2 Appendix B). They were informed that the game was to perform three blocks of the experiment to find a pirate’s treasure. In each block they would ‘help a dog find his bone’ by pressing the button when they heard the dog bark and were told they should not press the button if they hear any other funny sounds. At the end of each block, children took a break to move a token from one to another island and, eventually, reach the treasure on the last island. During breaks, experimenters and children sang a nursery song while pretending to row to the next island. If children did not wish to complete all three blocks they still chose an educational toy to take home with them.

During the task, participants were seated in front of a laptop (approximately 50 cm from the screen) that presented pictures and sounds and recorded behavioral responses using

Presentation software (Neurobehavioral Systems, Albany, CA, USA). Auditory stimuli were played in headphones. Participants performed three 4-min. blocks of 48 pseudo-randomized trials each. The order of the three blocks was randomized across participants using a Latin square. The experimenter gave verbal instructions accompanied by visual illustrations of the task (see Fig. A3 Appendix B). Children were instructed to press a button on the keyboard with the hand that they mainly use when they draw or write their name. At the end of the first block, every participant verbally confirmed to the experimenter that they were able to distinctly hear the dog bark during the task. An experimental session lasted around 30 minutes.

### 3.4. Measurement parameters

We used a custom MATLAB program to extract and preprocess behavioral data. First, we visually inspected the reaction time distribution relative to target onset for each age (see Fig. A4 Appendix C). The shortest reaction time for a correct response (RT lower limit) was calculated for each age range (see Fig. A4 and Appendix C). For each participant, the longest reaction time for a correct response (RT upper limit) was calculated from all  $RT > 0ms$  using the Tukey method of leveraging the Interquartile Range. Correct response rate corresponds to the percentage of responses with a reaction time (relative to target onset) superior or equal to RT lower limit and inferior or equal to RT upper limit.

Eight behavioral measures were extracted for each child (Tab. 2. see also Fig. A5 Appendix D):

**Table 2 | Behavioral measurements, parameters for calculations and measured construct.**

| Behavioral measurements of attention effects on target processing |                                      |   |  |
|---|--------------------------------------|---|--|
| Measure Abbreviation  | Measure Name                         | Measure Description   | Measured Construct   |
| RT  | Reaction times                       | RT of positive response times   | Overall processing speed   |
| Arousal effect  | ""                                   | Median RT: NoDis – Dis1   | Facilitation effect:<br>Index of arousal due to presence of early distractor |
| Distraction effect  | ""                                   | Median RT: Dis3 – Dis1  | Distraction effect:<br>Index of competition between distractor and target    |
| RT SD   | Standard deviation of reaction times | Mean standard deviation of positive response times in the NoDis condition for each block separately   | Variability in processing speed<br>Sustained attention                       |
| LateRep   | Late response                        | Percentage of responses in the NoDis condition during the period starting from the RT upper-limit to 3300 ms  | Slow processing error<br>Failure of short term sustained attention           |
| MissRep   | Missed response                      | Percentage of trials without any response made during the entire trial duration up to 3300 ms post-target   | Error of omission<br>Lapse of sustained attention                            |
| Behavioral measurements of attention effects on target expectancy |                                      |   |  |
| Measure Abbreviation  | Measure Name                         | Measure Description   | Measured Construct   |
| CueRep  | Cue response                         | Percentage of [incorrect or false-alarm] responses performed during the 150-450ms period post-cue onset   | Erroneous response to the cue<br>Impulsivity                                 |
| DisRep  | Distractor response                  | Percentage of responses performed during the 150-450 ms period post-distractor onset  | Erroneous response to the distractor<br>Impulsivity                          |
| AntRep  | Anticipated response                 | Percentage of responses performed:<br>In NoDis and Dis1: from 300 ms pre-target to the RT lower limit post-target<br>in Dis2: from 150 ms pre-target to the RT lower limit post-target<br>in Dis3: from 100 ms post-target to the RT lower limit post-target  | Erroneous response in anticipation of the target<br>Impulsivity              |
| RandRep   | Random responses                     | Percentage of responses performed in the remaining periods of the trials within the 150 ms post-cue onset:<br>in NoDis: during the 450 to 850 ms period post-cue onset<br>in Dis1: during the 450 to 550 ms period post-cue onset<br>in Dis2: during the 450 to 750 ms period post-cue onset<br>in Dis3: during the 450 to 950 ms period post-cue onset | Erroneous response outside of response parameters above                      |

### 3.5. Statistical analysis

Behavioral data were analyzed using advanced multivariate statistical modelling.

#### *i. Sample characteristics*

Bayesian statistics were used to test the probabilistic certainty that the multivariate measures are related. Bayesian statistics were performed using JASP® software (JASP Team (2018), JASP (Version 0.9) [Computer software]).

To confirm that our sample population was similarly distributed across age ranges in block order, gender, and SES, we performed Bayesian contingency table tests. We reported Bayes Factor ( $BF_{10}$ ) as a relative measure of evidence. To interpret the strength

of evidence in favor of the null model (uniform distribution), we considered a BF between 0.33 and 1 as weak evidence, a BF between 0.1 and 0.33 as positive evidence, a BF between 0.01 and 0.1 as strong evidence and a BF lower than 0.01 as a decisive evidence. Similarly, to interpret the strength of evidence against the null model, we considered a BF between 1 and 3 as weak evidence, a BF between 3 and 10 as positive evidence, a BF between 10 and 100 as strong evidence and a BF higher than 100 as a decisive evidence (Lee & Wagenmakers, 2013).

## *ii. Behavioral data analysis*

**Frequentist statistical approach.** We expected large inter-individual variability in RT and response type rates as a function of condition. This behavioral response variability limits the comparison of data between conditions and means that data cannot simply be pooled for analysis. Generalized General Linear Model (GLMM) are the best way to deal with such datasets, as they allow for correction of systematic variability (Bates et al., 2015). The heterogeneity of performance between subjects and experimental conditions was taken into account by defining them as effects with random intercepts and slopes, thus instructing the model to correct for any systematic differences in variability between the subjects (between-individual variability) and condition (between-condition variability). To confirm the need for mixed nested models, we used a likelihood ratio analysis to test the model fit before and after sequential addition of random effects. We used the Akaike Information Criterion and the Bayesian Information Criterion as estimators of the quality of the statistical models generated (Matuschek et al., 2017). To optimize our model, we checked the normality of the model residual.

To assess the impact of the manipulated task parameters (cue information and distractor type) and participant demographics characteristics (age and SES), on each type of behavioral measure (RT, RT SD, LateRep, MissRep, CueRep, DisRep, AntRep, RandRep), we analyzed the influence of four possible fixed effects (unless specified otherwise in the next section):

- 1) between-subject factor AGE: 2 levels (see Table 1);
- 2) between-subject factor SES: 2 levels (lower and higher);
- 3) within-subject factor CUE and CUE: 2 levels (CUE: informative vs. uninformative);

4) within-subject factor DISTRACTOR: 4 levels (NoDis, Dis1, Dis2 and Dis3), except for DisRep: 3 levels (Dis1, Dis2 and Dis3).

A summary of the data and factors used in statistical modeling can be found in Table 2. Note that for response types cumulating less than a mean of 10 observations across subjects (CueRep, DisRep and LateRep), we did not consider the within subject factor DISTRACTOR in the analysis.

Because both fixed and random factor was taken in account for statistical modelling, we ran a type II analysis of variance. Wald chi-square tests were used for fixed effects in linear mixed-effects models (J. Fox & Weisberg, 2018). We only considered the explanatory variables. The fixed effect represents the mean effect across all subjects after correction for variability. Frequentist models and statistics were performed in R@ 3.4.1 using the `lme4` (Bates et al., 2015) and `car` (J. Fox & Weisberg, 2018) packages. We considered results of main analyses significant at  $p < .05$ .

When we found a significant main effect or interaction, the Post-hoc Honest Significant Difference (HSD) post-hoc tests were systematically performed using the `emmeans` package (`emmeans` version 1.3.2). P-values were considered as significant at  $p < .05$  and were adjusted for the number of comparisons performed.

In the Results section, we report the SEM as the estimator of the distribution dispersion of the measures of interest, when not specified.

To ensure that analyses were performed on a sufficient number of trials per condition, participants with fewer than 12 trials with positive RT in each of the distractor conditions ( $N = 6$ ) were excluded from median RT analysis (leading to a total average of trials with positive RT of  $49 \pm 1.8$  in NoDis,  $16 \pm 0.7$  in Dis1,  $15 \pm 0.6$  in Dis2 and  $16 \pm 0.6$  in Dis3 conditions across the overall sample). Revised sample sizes for median RT analysis are: 4 year-olds:  $n = 23$  and 5 year-olds:  $n = 43$ ). The percentage of missing data over the total sample of included subjects in analyses is shown in Table 3.

Raw RT were log-transformed at the single trial scale for RT and SD RT analyses to be better fitted to a linear model with Gaussian family distribution; Response types were re-fitted to a linear model with binomial distribution without transformation (see Tab. 3 and Appendix E for additional details).

**Table 3 | Main statistical analyses according to behavioral response types.** Experimental conditions, factors and models used as a function of the behavioral measurement. Detailed factor levels: Age = 4 vs. 5; SES = lower vs. higher; CUE = informative vs. uninformative.

| Response type                | Condition(s) used for response type calculation | Fixed factor(s)         |                        | Random factor       | Distribution fitting | Missing data |
|------------------------------|---|-------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|--------------|
|                              |   | <i>Between subjects</i> | <i>Within subjects</i> |                     |                      |              |
| <b>RT (log)</b>              | NoDis vs. Dis1 vs. Dis2 vs. Dis3                | Age, SES                | Cue, Distractor        | Distractor, Subject | Gaussian             | 8.5 %        |
| <b>RT SD (log)</b>           | NoDis vs. Dis                                   | Age, SES                | Block                  | Subject             | Gaussian             | 8.5 %        |
| <b>Late responses</b>        | NoDis   | Age, SES                | Cue                    | Subject             | Binomial             | 0.0 %        |
| <b>Missed responses</b>      | NoDis vs. Dis1 vs. Dis2 vs. Dis3                | Age, SES                | Cue, Distractor        | Subject             | Binomial             | 0.0 %        |
| <b>Cue responses</b>         | NoDis & Dis1 & Dis2 & Dis3                      | Age, SES                | Cue                    | Subject             | Binomial             | 0.0 %        |
| <b>Distractor responses</b>  | Dis1 & Dis2 & Dis3                              | Age, SES                | Cue                    | Subject             | Binomial             | 0.0 %        |
| <b>Anticipated responses</b> | NoDis vs. Dis1                                  | Age, SES                | Cue, Distractor        | Distractor, Subject | Binomial             | 0.0 %        |
| <b>Random responses</b>      | NoDis & Dis1 & Dis2 & Dis3                      | Age, SES                | Cue                    | Subject             | Binomial             | 0.0 %        |



## 4. Results

### 4.1. Sample characteristics

Using Bayesian contingency table tests, we found positive evidence for a similar distribution in block order ( $BF_{10} = 0.133$ ) and gender ( $BF_{10} = 0.323$ ) across age ranges. We observed weak evidence for a similar distribution in SES ( $BF_{10} = 0.746$ ) across age: more precisely, this indicates that the number of participants 5-year-olds is reduced in the higher SES group.

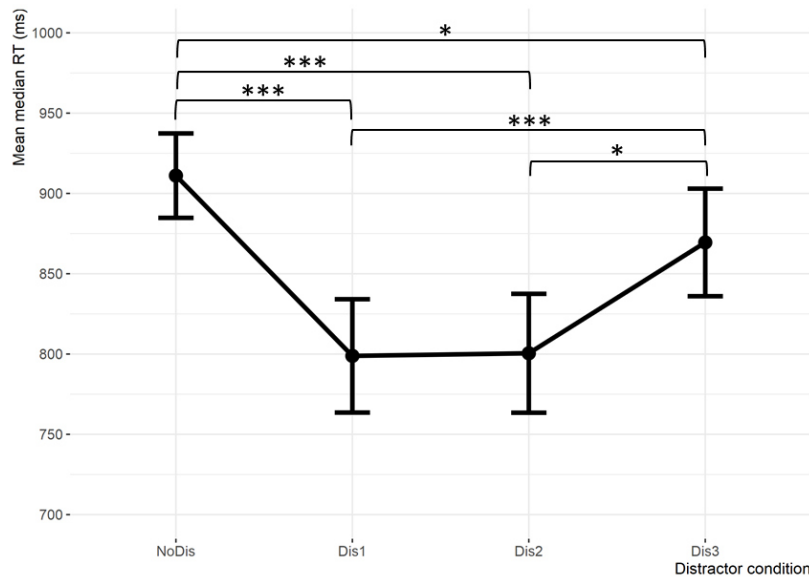
### 4.2. Behavioral Data

For each type of behavioral measurement, we analyzed the influence of AGE, GENDER, SES, CUE, and DISTRACTOR factors (unless specified otherwise in the Table 3). In the following, when a factor was involved in a main effect and a higher order interaction, we only specified the post-hoc analysis related to the interaction.

#### *i. Reaction Times*

As expected, a main effect of AGE ( $\chi^2(1) = 6.45$ ;  $p < .05$ ) on median RT indicated that 4-year-old children ( $985.0 \pm 73.0$  ms) were overall slower to respond than 5-year-olds ( $768.6 \pm 28.7$  ms). Irrespective of age, children were faster when the cue was informative ( $833.6 \pm 32.7$  ms) rather than uninformative ( $872.6 \pm 38.9$  ms; main effect of CUE: ( $\chi^2(1) = 4.32$ ;  $p < .05$ ).

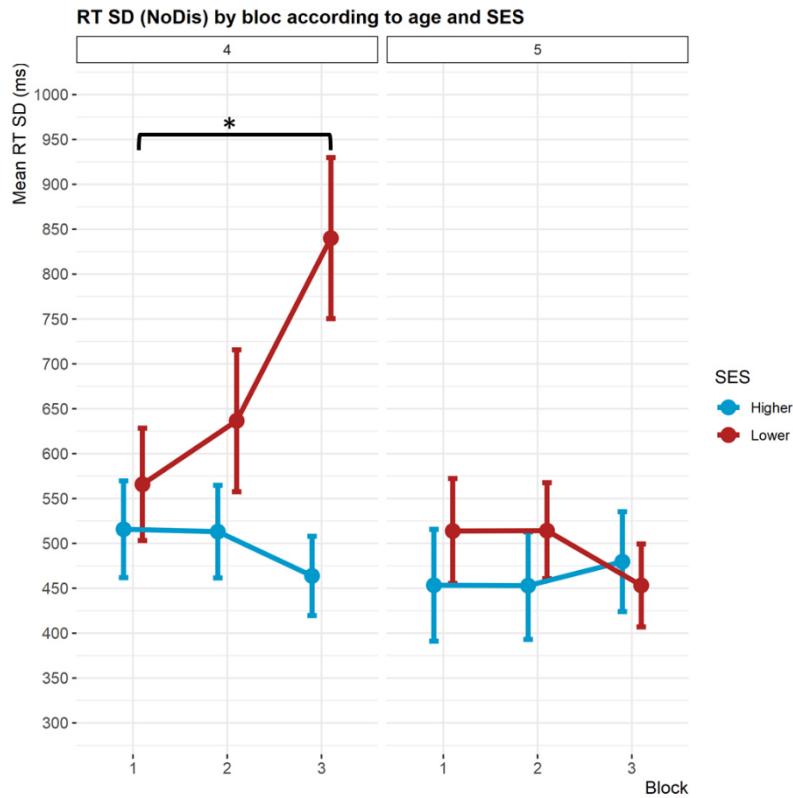
Consistent with our previous work in older children and adults, we observed a main effect of the DISTRACTOR ( $\chi^2(3) = 180.4$ ;  $p < .001$ ; see Fig. 2) on median RT. Post-hoc pairwise comparisons showed that distractors speeded the response to targets. RTs were slower in NoDis ( $898.5 \pm 35.0$  ms) than in Dis1 ( $766.1 \pm 39.0$  ms), Dis2 ( $801.5 \pm 49.2$  ms) and Dis3 ( $848.2 \pm 42.6$  ms) conditions. As shown in Figure 2, slower median RTs were observed in Dis3 compared to Dis1 and Dis2 conditions, whereas no difference was found between Dis1 and Dis2 conditions ( $p = .345$ ).



**Fig. 2 | Median RT as a function of distractor condition.** Mean of median reaction time as a function of the distractor condition [NoDis, Dis1, Dis2 and Dis3] ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*; Error bars represent 1 SEM).

### *ii. Standard deviation of reaction times*

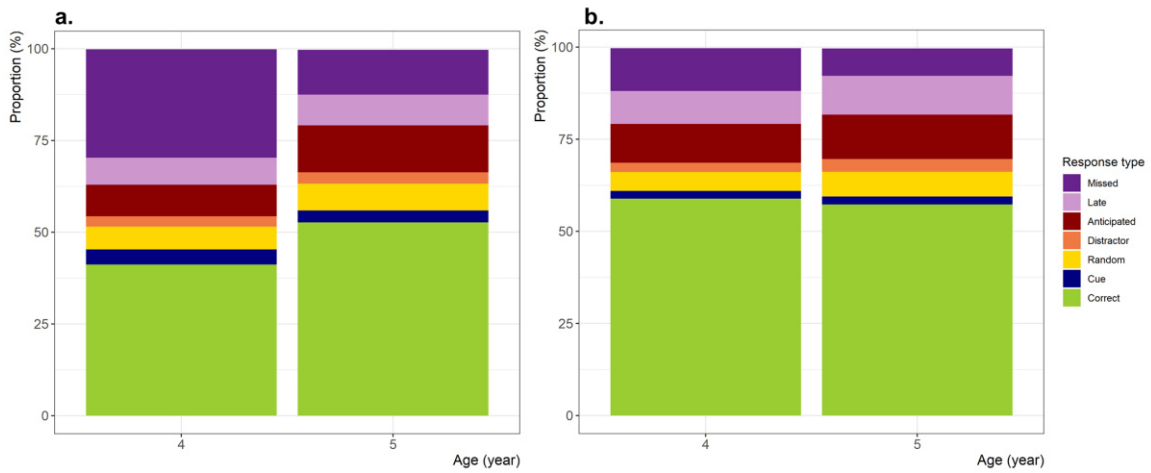
Although we observed a main effect of AGE ( $\chi^2 (1) = 5.5$ ;  $p < .05$ ) on response time variability (RT SD), this should be interpreted in light of a significant three-way AGE by BLOCK by SES interaction ( $\chi^2 (2) = 7.3$ ;  $p < .05$ ; Fig. 3). Post-hoc analysis revealed that 4-year-old children from lower SES sites showed higher RT SD during third block ( $565.7 \pm 62.6$  ms) compared to the first one ( $840.0 \pm 89.7$  ms).



**Fig. 3 | Mean RT SD in NoDis condition by block as a function of age.** Mean of median reaction time as a function of the block [1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup>] as a function of age [4-year-olds on the left and 5-year-olds on the right] ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*; Error bars represent 1 SEM).

### iii. Global accuracy

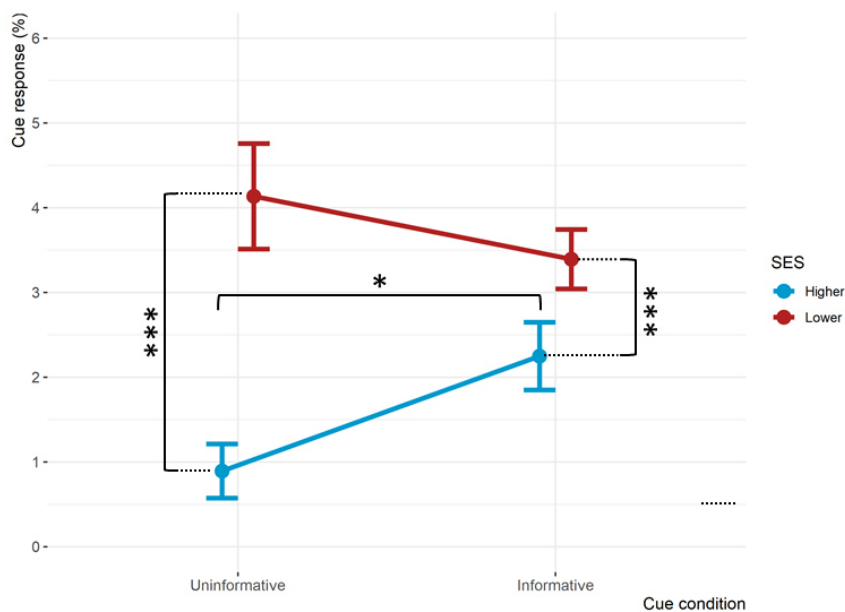
The proportion of the different types of behavioral responses according to age is depicted in Fig. 4. The average correct response rate was  $50.7 \pm 2.2\%$ . No main effect of AGE or SES, nor interaction with AGE or SES, was found for LateRep (total average:  $9.9 \pm 0.6\%$ ; Fig. A6b Appendix F), RandRep (total average:  $6.0 \pm 0.7\%$ ; Fig. A7b Appendix G), DisRep (total average:  $5.9 \pm 0.9\%$ ; Fig. A7c Appendix G), AntRep (total average:  $13.8 \pm 1.1\%$ ; Fig. A7d Appendix G). Significant effects of age and SES on the other response types are detailed in the following sections.



**Fig. 4 | Response type proportion as a function of age and SES. Response type proportions for (a) lower and (b) higher SES groups.**

#### iv. Erroneous responses to cue

The rate of cue responses (CueRep,  $2.9 \pm 0.4\%$  on average) was modulated by SES ( $\chi^2(1) = 7.0$ ;  $p < .01$ ). A CUE by SES interaction was also significant ( $\chi^2(1) = 6.8$ ;  $p < .01$ , Fig. 5). Post-hoc analysis revealed that children from the lower SES group ( $3.7 \pm 0.5\%$ ) made more CueRep than children in the higher SES group ( $1.6 \pm 0.5\%$ ) irrespective of the validity content of the cue. Additionally, children from higher SES backgrounds made more CueRep in the informative condition ( $2.2 \pm 0.6\%$ ) compared to the uninformative one ( $0.9 \pm 0.4\%$ ).



**Fig. 5 | Cue response by cue condition as a function of SES.** Mean percentage of cue response as a function of cue type [informative and uninformative] and SES [blue – higher SES group, red – lower SES group] ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*; Error bars represent 1 SEM).

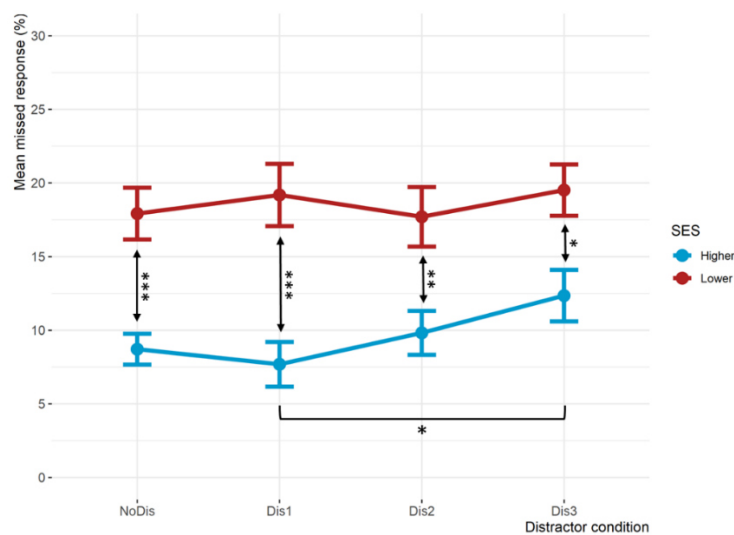
### v. Erroneous responses in anticipation of target

The rate of anticipated responses (AntRep,  $13.8 \pm 1.1\%$  on average) was modulated by DISTRACTOR ( $\chi^2(1) = 46.0$ ;  $p < .001$ ). Children had higher proportions of AntRep in Dis1 ( $18.7 \pm 1.8\%$ ) than in NoDis condition ( $8.9 \pm 0.9\%$ ) regardless of age and SES.

### vi. Missed responses

The rate of missed responses (MissRep,  $15.1 \pm 1.5\%$  on average) was modulated by AGE ( $\chi^2(1) = 15.4$ ;  $p < .001$ ): 4-year-olds ( $21.4 \pm 3.2\%$ ) made more MissRep than 5-year-olds ( $1.3 \pm 1.3\%$ ) (Fig. A6a Appendix F).

We also observed significant main effects of SES ( $\chi^2(1) = 15.0$ ;  $p < .001$ ), as well as a significant DISTRACTOR by SES interaction ( $\chi^2(3) = 8.5$ ;  $p < .05$ ; Fig. 6). According to HSD post-hoc comparisons, and irrespective of the distractor condition, participants from lower SES backgrounds ( $9.6 \pm 1.6\%$ ) made more MissRep than participants from higher SES backgrounds ( $18.6 \pm 1.2\%$ ). Additionally, children from higher SES, only, made more MissRep in the Dis3 condition ( $12.4 \pm 1.7\%$ ) compared to the Dis1 condition ( $7.7 \pm 1.5\%$ ).



**Fig. 6 | Missed response by distraction condition as a function of SES.** Mean percentage of missed response as a function of cue [informative and uninformative] and SES [blue – higher SES group, red – lower SES group] ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*; Error bars represent 1 SEM).

## 5. Discussion

The present study aimed to characterize different components of attention and distraction in young children and to determine the extent to which SES impacts variability in the development of these components in early childhood. Consistent with our previous work in older children and adults, we documented a facilitation of RT with both informative cues and the presence of distractors, suggesting that this paradigm is a valid measure of these constructs in younger children. In addition, 4- and 5-year-old children also showed a higher proportion of anticipated responses in the presence of a distractor, indicating increase impulsivity.

We also compared 4- and 5-year-old children from higher and lower SES backgrounds and found several differences as a function of SES. Four-year-old children from lower SES backgrounds had higher variability in response times, although this difference was not present in the older age group. SES differences were also found in the proportion of erroneous responses made. Children from the lower SES group made more erroneous responses to the cue than children from the higher SES group, suggesting greater impulsivity in the lower SES group. Yet they also missed more targets, indicating a reduced ability to recover from distraction.

Below, we discuss the implications of these findings, and the caveats of our conclusions.

### 5.1. General development of attention with age

Although there is an established literature on multifaceted components of attention in children, few studies have focused on the development of specific aspects of distractibility in the preschool age, a time when attention systems are rapidly developing (Posner et al., 2014; Rothbart et al., 2011; Rueda et al., 2004).

**Voluntary orienting toward relevant stimuli.** As attentional orienting is conceptualized as depending on the executive system (Posner, 1980, 2012), the re-orientation process may particularly improve between the ages of four and five due to the maturation of the prefrontal cortex (Brown & Jernigan, 2012; Giedd et al., 1999; Gogtay et al., 2004), which is important for efficiency of the executive system (Koechlin & Summerfield, 2007; Moriguchi & Hiraki, 2013; Posner, 1980, 2012). In this interpretation, increased reaction time in preschool-aged children with a 600 ms distractor-target delay would reflect an inability to voluntarily re-orient attention on the target following a distractor,

rather than the sole effect of distraction on ongoing performance. Therefore, in future research on the development of distractibility during the preschool years, it will be important to measure phasic arousal in response to relevant events and executive efficiency to understand the precise effect of distraction on children's behavior.

**Distraction and Facilitation due to Arousal in Children.** The strength of the CAT lies in the differential timing of distractor sounds before the target, allowing the dissociation of the behavioral costs and benefits they induce. In line with previous studies using the CAT in adults (Bidet-Caulet et al., 2015; ElShafei, Bouet, et al., 2018; ElShafei et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019), we observed two distinct effects on RTs triggered by the distracting sounds. First, distracting sounds played long before the target (Dis1 and Dis2) speeded reaction times compared to a condition without distractor (NoDis): this benefit in RT has been attributed to an increase in phasic arousal (Masson & Bidet-Caulet, 2019). Second, distracting sounds played just before the target (Dis3) slowed reaction times compared to conditions with a distractor played earlier (Dis1 and Dis2): this cost in RT is considered a good behavioral approximation of distraction (Bidet-Caulet et al., 2015; ElShafei et al., 2019; Hoyer et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019).

Both phasic arousal and distraction effects were observed between 4 and 5 year olds. This suggests that the CAT thus permits the dissociation of arousal and distraction effects in preschool-aged children in a similar manner as has been shown with school-aged children and adults (Hoyer et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019). The developmental trajectories of these two effects were previously found to be different during the school age (Hoyer et al., 2019). While the distraction effect has not been found to change significantly from school age to adulthood, the arousal facilitation effect decreases from 9 to 13 years of age. The present study extends these findings to show that they are dissociated during the preschool period.

Previous results suggest that the physiological effect of phasic arousal is observable even before the first year of life; findings from the present study bolster this assumption by revealing that increased phasic arousal following a distractor facilitates the processing of the subsequent target in both 4 and 5-year-old children. Furthermore, phasic arousal depends on sound properties (Max et al., 2015; Parmentier & Andrés, 2010; SanMiguel, Linden, et al., 2010; Wetzel et al., 2012) and the level of tonic arousal (Aston-Jones & Cohen, 2005; Howells et al., 2012) which is in turn influenced by the task demands (M. Eysenck, 1982; Kahneman, 1973; Yerkes & Dodson, 1908). These factors should be taken into account in future research to refine the understanding of phasic arousal effects on behavior in 4- and 5- year olds.

Although the distraction and arousal effects were not different between 4 and 5-year-olds, it is nevertheless interesting to note that both these measurements continue to decrease with age in children and adults from 6 to 25 years old (Hoyer et al., 2019). While RT distraction is not modulated by age through childhood, the arousal facilitation effect was found to be enhanced in 6-to-8-year-old children, and then to progressively decrease from 9 to 13 years before reaching adult-like efficiency at age 14 (see Fig. 7). So far, few studies have investigated the development of distraction in preschool-aged children using active behavioral tasks. Recent results from oddball paradigms, however, suggest that distraction effects would be expected to be greater in 4- compared to 5-year-old children, and would progressively decrease from childhood to adulthood (Wetzel et al., 2018). The discrepancy between this evidence and results from the present study may be explained by the distractor-target interval duration. Oddball paradigms usually used a long distractor-target delay; with such a delay, the attentional capture is believed to be over when the target sound occurs (Bidet-Caulet et al., 2015; Masson & Bidet-Caulet, 2019). If preschool-aged children show reduced phasic arousal, and this arousal can facilitate controlled attentional processes, it is therefore possible that this lack of phasic arousal would result in a reduced ability to re-orient attention toward the target following a distractor.

The present results suggest that phasic arousal and distraction may not follow distinct developmental trajectories. However, the precise relationship between arousal and distraction still needs to be characterized, and CAT measures should not be considered markers of independent cognitive functions, but as complementary measures of the impact of distractors on performance.

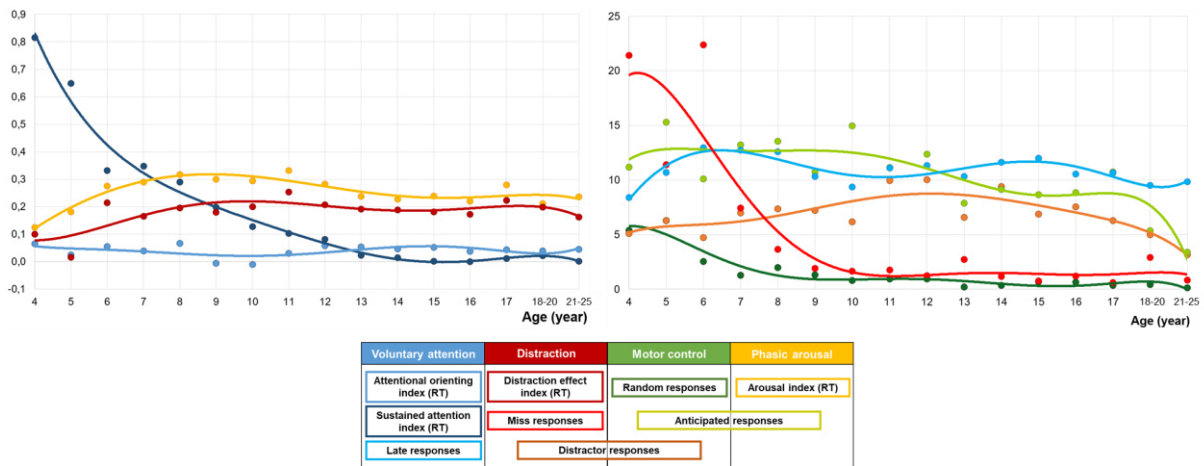
**Motor Control and Impulsivity in Children.** In the CAT paradigm, cue, distractor and random responses are conceptualized as complementary measures of impulsivity and motor control. We hypothesized that impulsivity and motor control would decrease during the preschool period. However, the present findings indicate that none of these measures were modulated by age, suggesting that impulsivity and motor control efficiency are not different from 4 to 5 years of age. Previous research mostly used subjective teacher and parent self-report measures and/or objective measures from child-friendly versions of CPT, Go-NoGo, and Stop Signal tasks, all of which solicit the ability to inhibit an ongoing motor response when a rare distractor occurs. Results from past studies are contradictory: some findings indicate that behavioral indices of impulsivity and motor control decrease and increase, respectively, between three and six years of age (Carver et al., 2001; Kanaka et al., 2008; Tao et al., 2014; Tillman et al., 2007; Wiebe et al., 2012), while others did not



observe significant differences between three and five years of age (Mahone et al., 2001; McGoey et al., 2007).

It is important to note that these processes occur within a behavioral context where different aspects of the task affect others. For example, while the mean rate of anticipated responses is quite variable with during the preschool age and participants made anticipated responses to the target only in presence of a distractor, suggesting that processes triggered by distractors influence the behavioral expression of anticipated responses. These anticipatory responses following distracting sounds could be either driven by the phasic arousal increase triggered by distractors or by reduced voluntary inhibitory motor processes.

**Sustained Attention in Children.** The number of missed responses in attentional tasks is a sensitive measure of sustained attention over long time periods (Kanaka et al., 2008), while the proportion of late responses is considered to be an index of short-term sustained attention (Hoyer et al., 2019; Petton et al., 2018). In the present study, and irrespective of the distractor condition, 4-year-old children showed reduced sustained attention ability when compared with their 5-year-old peers as indexed by missed responses. However, no effect of the age was observed for the late response type, suggesting that children's ability to maintain attention over shorter time periods is stable from 4 to 5 years of age. A decrease in missed responses from 4 to 5 years of age is then more likely to be the result of lower tonic arousal levels in the younger age group. Furthermore, 3-year-old children were excluded from analysis due to their random behavioral performance in the CAT task: an inability to adequately perform the task at 3 years of age could also be explained by reduced sustained attention ability, as previously observed in the literature (Mahone et al., 2001). To that extent, sustained attention ability at 3 years of age would be too precarious to enable children performing the CAT task, but with the rapid brain maturation occurring during the preschool years, and particularly at age four (Brown & Jernigan, 2012), children at that age have sufficient sustained attention abilities to perform the task, and improvements in performance are found at age five.



**Fig. 7 | Graphical representation of the developmental trajectories of the distractibility components measured by the CAT task: present and past findings.** Please, note that this figure is based on a combination with the present results in preschool children and previous from a CAT study in school-aged children and adults **a**, Reaction times normalized measures according to age. Curves correspond to polynomial fitting curves for the Sustained Attention (order 4) and Arousal (order 4) measures, and to fitting lines for the Distraction and Attention Orienting measures. Sustained attention measure = mean RT SD for each age range normalized across age ranges; Attention orienting measure =  $(\text{medianRT}_{\text{NoDisUninf}} - \text{medianRT}_{\text{NoDisInt}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ ; Arousal measure =  $(\text{medianRT}_{\text{NoDis}} - \text{medianRT}_{\text{Dis1}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ ; Distraction effect measure =  $(\text{medianRT}_{\text{Dis3}} - \text{medianRT}_{\text{Dis1}}) / \text{medianRT}_{\text{All}}$ . **b**, Percentage of late responses (LateRep), miss responses (MissRep), responses to distractors (DisRep), anticipated responses (AntRep) and random responses (RandRep) according to age. Dots represent the mean percentage. Curves correspond to polynomial fitting curves for LateRep (order 6), MissRep (order 6) DisRep (order 6) and AntRep (order 6), and to a fitting line for RanRep. Measures reflecting (1) voluntary attention are in blue colors, (2) distraction are in red colors; (3) motor control are in green colors, and (4) arousal are in yellow color. Brown and light green colors represent processes overlaps. Dotted lines represent measures which have not been found modulated by age.

## 5.2. Development of distractibility as a function of SES

Previous research has found relationships between SES and a wide range of neurocognitive outcomes across development, and one of the most consistent of these is with SES and self-regulation, including attention (Pakulak et al., 2018; Ursache & Noble, 2016). Here we extend these findings by documenting relationships between SES and sustained attention, distraction, as well as motor control and impulsivity during a crucial period in the development of these skills and related brain systems.

**Distraction.** An increased in missed responses in trials with distractors has been linked to increased distraction effects (Wetzel & Schröger, 2007). Here we found that that children from lower SES backgrounds missed more targets than their peers from higher SES backgrounds, suggesting differences in the attentional balance between voluntary and involuntary attention (i.e., distractibility) as a function of SES. The lower SES group missed the target as much in every experimental condition; in contrast, children from the higher SES group showed increased missed response rates in trials with a short distractor-target interval (Dis3) compared to condition without distractors. Taken together, these results

suggest that distractibility follows different developmental trajectories as a function of SES and that children from lower SES backgrounds show increased distractibility.

Previous research which has attempted to characterize behavioral differences in attention during the preschool years and as a function of SES are relatively rare. Results from ERP studies of auditory selective attention have found that the neural response associated with the suppression of distracting information is particularly sensitive to differences associated with SES such that the response to distractors is typically larger in children from lower SES backgrounds, suggesting reduced ability to suppress distraction (Stevens et al., 2009; Giuliano et al., 2018; Hampton Wray et al., 2017). While this is broadly inconsistent with the results reported here, this discrepancy may be explained at least in part by differences in the tasks used to assess attentional capacities. The ERP paradigm was a dichotic listening task during which two stories were simultaneously played to the child, with the child instructed to attend one story and ignore the other, and with identical probe sounds superimposed on both stories. Behaviorally, this paradigm probes the child's ability to inhibit the continuous stream of distraction from the unattended channel, but also unexpected and isolated probe sounds. One can then imagine that the more demanding the task, the more the child will need to recruit the executive system to deal with its requirements. Because children from lower SES backgrounds have consistently been found to perform worse on executive function tasks, which may be related to a delay in the development of the prefrontal cortices (Lawson et al., 2013; Noble et al., 2012), they might then present a difficulty in suppressing distractors only when performing demanding tasks which to some degree require increased recruitment of the executive system.

Recent findings also suggest that for children from lower SES backgrounds there may be a potential biological cost of achieving performances more similar to their peers from higher SES backgrounds. Children from lower SES backgrounds who show brain responses to distractors more similar to their peers from higher SES backgrounds may accomplish this via activation of the sympathetic nervous system and a heightened alert state that contributes to distractor suppression (Giuliano et al., 2018). It is thus possible that children from lower SES backgrounds do not show differences in RT variability in trials with or without distractors as a result of an overall heightened state of alertness, in contrast to an effect more specific to the presence of distractors in children from higher SES backgrounds. Future research combining the CAT paradigm with measures of autonomic nervous system function in samples from a wide range of SES backgrounds will shed light on this possibility.

**Sustained attention.** Compared to their peers from higher SES backgrounds, we found evidence that four-year-olds from lower SES backgrounds had more difficulty sustaining attention over longer time periods. Specifically, we documented increased variability in RT variability across experimental blocks in younger children in the lower SES group, such that RT SD almost doubled between the first and third blocks in this group. Previous studies using a child-friendly ERP paradigm assessing sustained selective auditory attention have found differences in brain function for selective attention as a function of SES in this age group (Stevens et al., 2009; Hampton-Wray et al., 2017, Giuliano et al., 2018); consistent with the present results, evidence from one study suggests that SES differences evident at age four fade by age five (Hampton-Wray et al., 2017). Evidence also suggests that preschool-aged children from lower SES backgrounds show differential functional maturation of prefrontal cortices (Lawson et al., 2013; Noble et al., 2012). Taken together, this suggests that preschool-aged children from lower SES backgrounds show an attentional imbalance characterized by reduced voluntary sustained attention in particular at age four. Importantly, rather than being considered a deficit, this attentional imbalance could reflect an adaptive attentional maturation. Lower SES environments are typically more chaotic and unpredictable, and in such environments it would be adaptive to maintain more constant alertness to possible changes in the environment.

**Motor control and impulsivity.** Motor control and impulsivity are sometimes used interchangeably, as dissociating their behavioral effects is challenging. In clinical settings, when assessing Attention Deficit Disorder, these two components are combined within the Impulsivity/Hyperactivity category of symptoms (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, 2013). Impulsivity refers to the tendency to react prior to a target occurrence, while motor control refers to the voluntary control of motor function even in absence of any stimuli. In the CAT, cue responses are conceptualized as a possible operationalization of impulsivity. Children from lower SES backgrounds made significantly more cue responses than their peers from higher SES backgrounds, who also showed more cue responses in informative than uninformative trials. These findings thus suggest that children from lower SES backgrounds may be more impulsive. As discussed above, this tendency to react to irrelevant stimuli could reflect an adaptive response in certain contexts, such as the need to maintain alertness to potential threats in more chaotic and unpredictable environments. Children from higher SES backgrounds, in contrast, are more likely to respond impulsively to relevant - but non-target - stimuli if they are highly predictive of the forthcoming target. However, this interpretation should be interpreted cautiously

because cue responses have not been identified as a behavioral marker of interest in assessing attentional balance and impulsivity in a school-age sample (Hoyer et al., 2019). This highlights the need for further research to precisely identify what types of attentional markers reflect the efficiency of a given cognitive function at each stage of development.

### 5.3. Conclusion

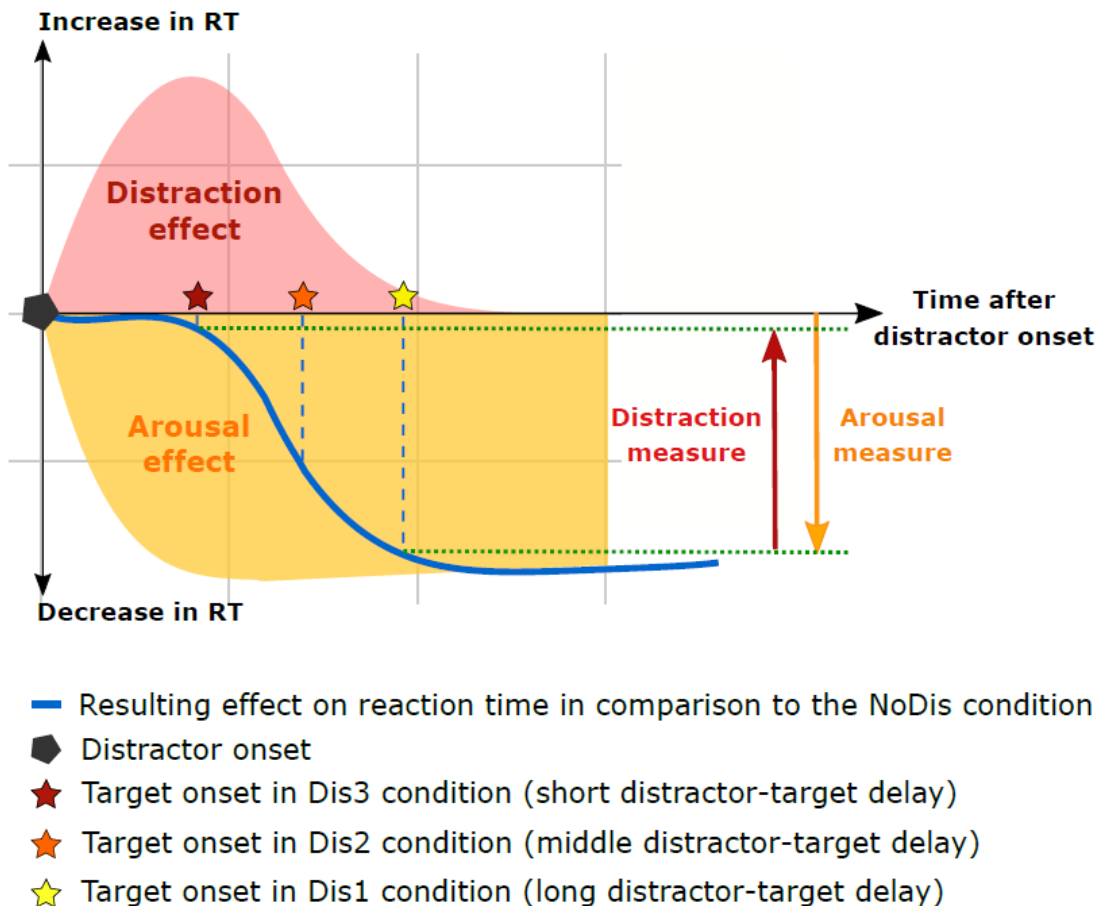
To our knowledge, this is the first study to provide precise developmental trajectories of several facets of distractibility during the preschool age. Results show that 4-year-old children present reduced voluntary sustained attention ability compared to their 5-year-old peers, even if this ability is still developing at this age and keep improving during school age and adolescence. Sustaining attention over time was found to be more difficult for children coming from lower SES; to overcome attentional lapses, children from lower SES may importantly recruit the alerting system, increasing their tonic arousal, and allowing them to better suppress the behavioral cost of distraction. By contrast, children from higher SES are better able of sustaining attention over time, but are more likely to respond impulsively to predictive stimuli and miss relevant target when a distracting sound occurs in the environment. Taken together, these findings suggest that the development of distractibility is adaptive: in a predictable and safe environment, young children from higher SES would be able to sustain their attention to achieve their goal, but their performances would be particularly impeded by the occurrence isolated irrelevant events in the environment. By contrast, lower SES children would show reduced sustained attention ability; to compensate for difficulties induce by this inability to maintain attentional orienting on relevant events, children from lower SES would importantly recruit the alerting system, whose effect would contribute to increase distractor suppression, helping children from lower SES to shield against distraction. These results then indicate that distractibility progressively develops during the preschool age, and suggest that adversity linked to the SES of the child family can modulate attentional performances starting from the younger age. Elucidating differences in distractibility during the preschool age according the children SES is relevant not only to our basic understanding of disparities related to SES, but may also have relevance for the timing or nature of interventions targeting attention skills (Neville et al., 2013; Posner et al., 2015; Tang & Posner, 2009). A better understanding of the causes of increased distractibility is crucial to improve rehabilitation or training programs to boost attention, either in a basic or clinical approach.

## 5.4. Limitations and future directions

Findings from this study provide evidence of maturational differences in attentional facets underlying distractibility in preschool-aged children from lower and higher SES backgrounds. There are, however, several limitations to the current study. First, the protocol used does not provide either stress and motivation or tonic arousal measurements: although these factors are believed to influence attentional performances, they would then need to be taken in account in further studies. Second, this cross sectional study allowed for age group comparisons but did not provided longitudinal data. Further studies are then needed to characterize individual variability in attention performance and to better identify predictors of attentional efficiency in children. Third, the SES group was defined by proxy using the school affiliation of the child, limiting the ability to characterize and control for variability within SES. Better understanding of the behavioral and brain signatures of attentional functioning in early childhood will provide fundamental knowledge to support the creation of evidence-based programs to train attention to compensate for difficulties in attention at school.

## 6. Appendix

### A. Behavioral arousal and distraction effect in the CAT paradigm



**figure A1. Schematic view of the cost and benefit triggered by distracting sounds.** The effect of distracting sound on reaction time (blue line) depends on the distractor-target interval in the task design and results from the combination of the beneficial arousal and detrimental distraction effects.

### B. Instructions and illustrations

#### 1. Treasure map

Here you have a treasure map. Do you see the treasure in this map? (find the treasure with the child) You will start here (first island on the left) and then move on the next island until you reach the island with the treasure. To move from your island to another one, you will play a schematic view on this laptop. Each time you finish a game, you will move forward one

island closer to the treasure. And when you finish all the games and reach the treasure, then you will get to choose a gift from this treasure box!

## *2. Competitive Attention Test instructions for preschool-aged children*

In this game you'll really need to pay attention and push the button as fast as you can.

This time you'll see a gray screen with a blue cross in the middle. This cross will disappear and then you'll see a dog. The dog will be either looking right at you or looking to one side.

When the dog is looking right at you, it means that he will soon bark in either in your right ear or in your left ear, but you won't know which one!

But when the dog is looking to the right, he's telling you that he'll soon bark in your right ear. When he's looking to the left, he's telling you that he'll soon bark in your left ear. Does that make sense?

You really have to pay attention to where the dog is pointing because he's telling you where he's going to bark! So he's helping you push the button as fast as you can when he barks. This is the button you push whenever he barks (show button)

Sometimes it's a little harder because when you see the dog you'll hear a bell. Don't click the button when you hear the bell – only when the dog barks! But you still have to click the button when the dog barks, even if it's after the ring. Does that make sense?

When you do a good job of pushing the button fast right after the dog barks, the dog will be happy and you'll see him with his bone in his mouth. It's OK if you make a mistake and click on the bell – you can still click again when the dog barks.

We'll play the game three times, and after each time we'll move closer to the treasure. Do you remember what happens when you get to the treasure? Yes – you get to choose a prize!





Fig. A2 | Treasure map used to motivate children during testing.

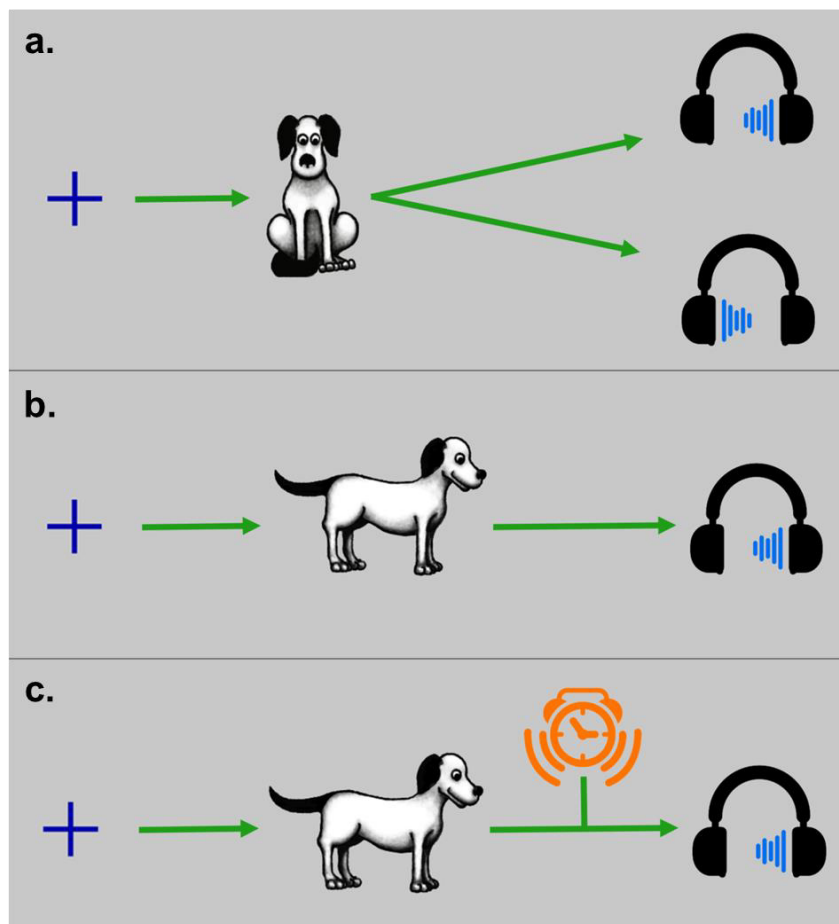
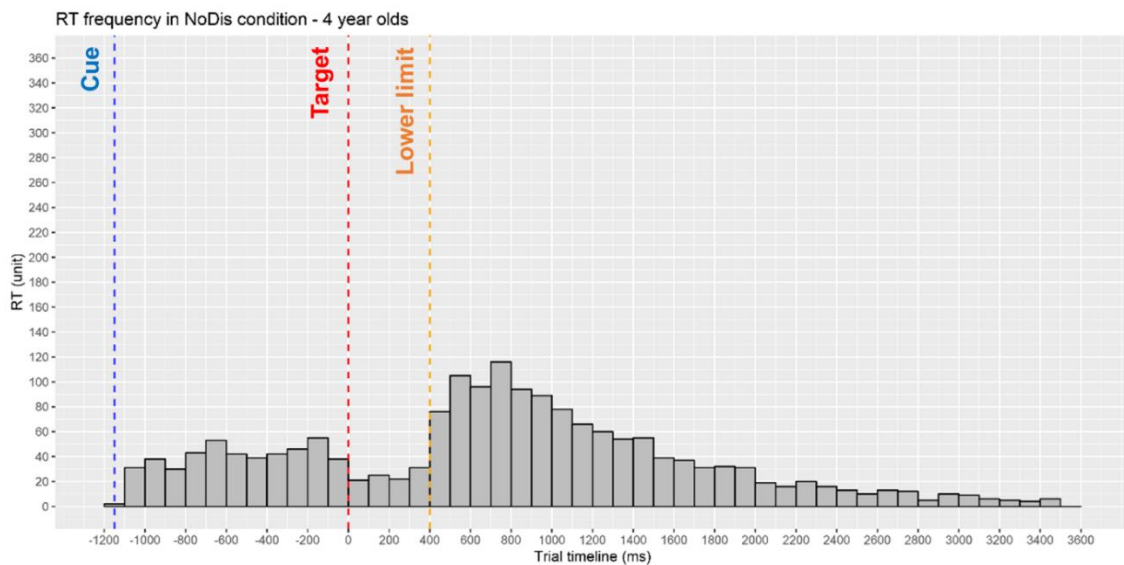


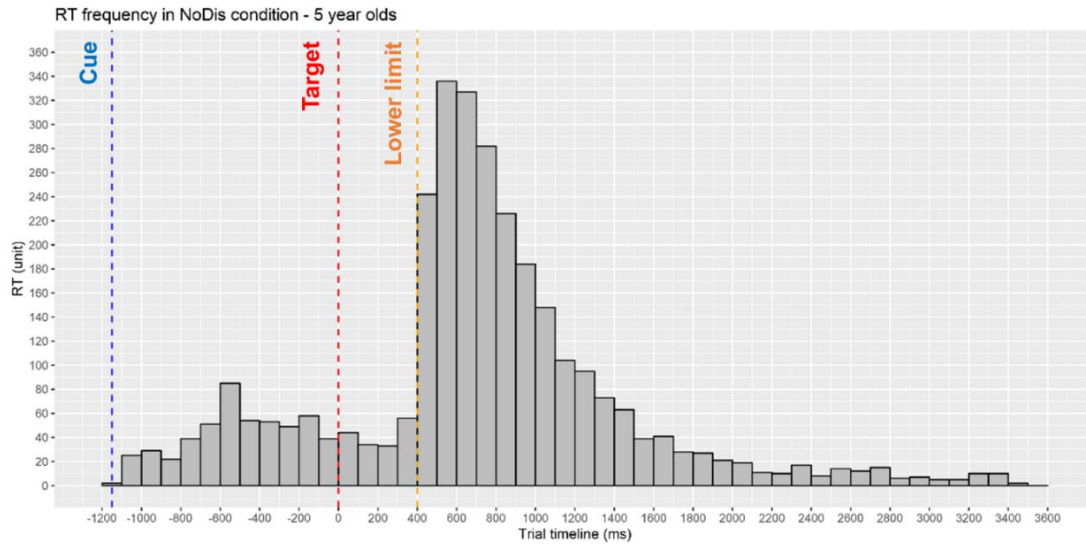
Fig. A3 | Illustration used to depict a) an uninformative NoDis trials, b) an informative NoDis trials and c) a distractor trial

### C. RT lower limit

To dissociate anticipated and fast correct behavioral responses, we identified a RT lower threshold (RT lower limit) for correct responses for each age group. We computed the frequency distribution of RT of all trials of all subjects by age range with a 50 ms step (see Fig. below). We considered the 100 to 500 ms period post target onset and performed ordered-timeline non parametric paired Wilcoxon tests for each age range to determine what lower RT threshold we should consider.

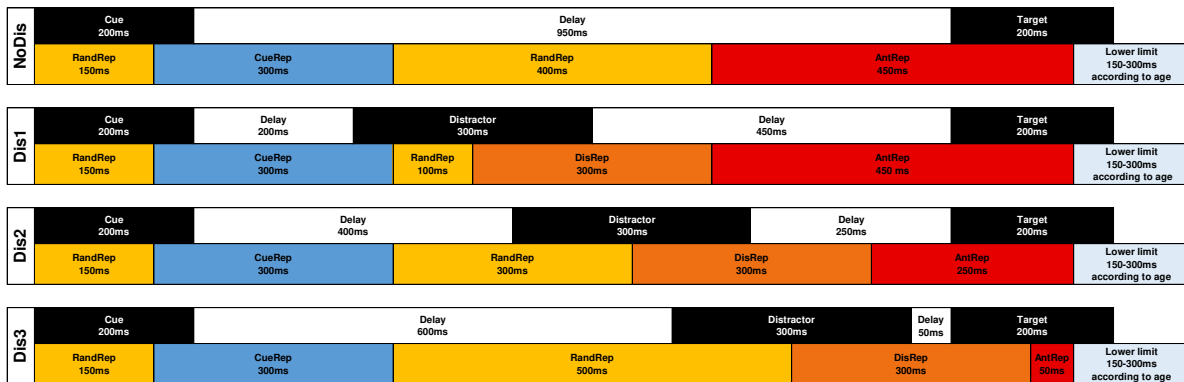
Ordered-timeline paired Wilcoxon tests on RT frequency distributions for every age range indicated that the percentage of responses became significantly larger (threshold:  $p < .05$ ) from the previous time range during the post target onset period of 400-450ms in both the 4 and 5-year-old children. Therefore, the shortest reaction time for a correct response (RT lower limit) was fixed to 400 ms in preschool-aged children.





**Figure A4. Lower RT limit according to age.** Histogram of the number of trials (y axis) according to the RT in ms (x axis) in the NoDis condition, across all participants of each age range. The blue dotted line indicates the cue onset; the red dotted line indicates the target onset; finally, the orange dotted line indicates the significant ( $p < .05$ ) threshold identified using ordered-timeline non-parametric paired Wilcoxon tests.

## D. Response type categorization



**Figure A5. Timeline for the behavioral response categorization during the CAT trials.** From top to bottom: NoDis, Dis1, Dis2 and Dis3 conditions. The top row depicts the timing of the task related events (cue, distractor and target); the bottom row shows the category in which the behavioral response is assigned based on timing of response. Abbreviations: Cue responses (CueRep), Responses to distractors (DisRep), anticipated responses (AntRep) and random responses (RandRep).

## **E. Details for statistical analyses of RT variability and erroneous responses**

RT SD were log-transformed at the single trial scale to be better fitted to a linear model with Gaussian family distribution, with the fixed factors AGE and SES as between-subject factor and BLOCK (3 levels) as within subject factor.

Response types were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation. GLMMs extend the linear mixed model to deal with non-normally distributed data. In particular, GLMMs can handle binary data. In this respect, GLMM analyses consider a number of data points equal to the total number of trials presented during the test, in each subject.

LateRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and SES as between-subject factors and CUE (2 levels) as the within-subject factor. Only the NoDis condition was analyzed since performance in this condition are a measurement of interest for characterizing attentional lapses.

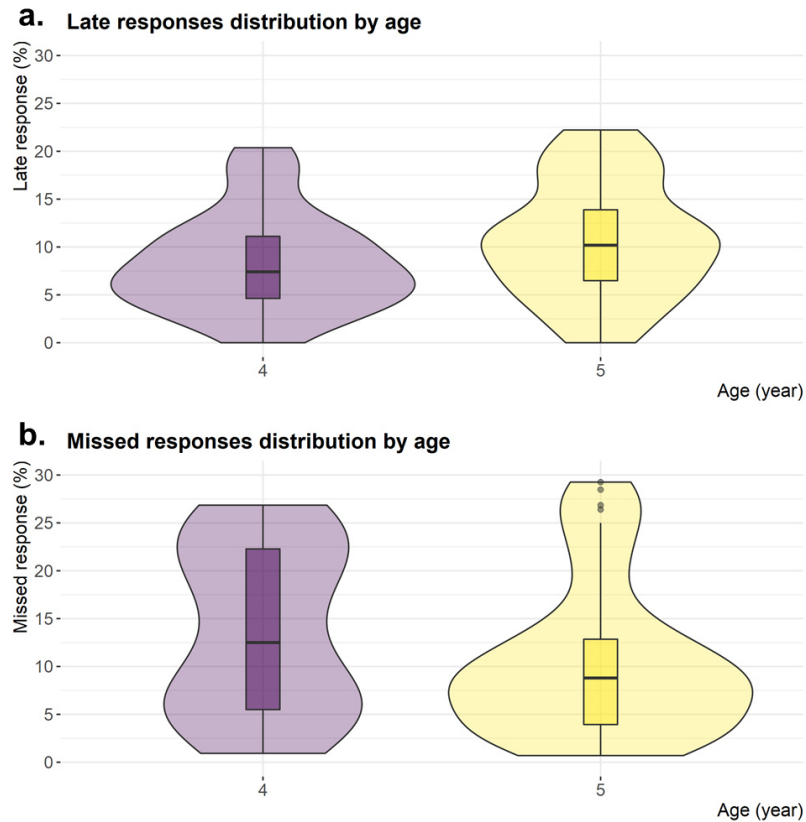
MissRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and SES as between-subject factors and CUE (2 levels) and DISTRACTOR (4 levels) as within-subject factors.

CueRep and Randrep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and SES as between-subject factors and CUE (2 levels) as the within-subject factor. As all participants made on average few CueRep and RandRep, responses were considered across all DISTRACTOR levels (NoDis, Dis1, Dis2, Dis3) and modeling was limited to two-way interactions.

DisRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and SES as between-subject factor and CUE (2 levels) as within subject factor. Responses were considered across DISTRACTOR levels (Dis1, Dis2, Dis3).

AntRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE and SES as between-subject factors and CUE (2 levels) as the within- subject factor. Because of the important differences in the duration of the AntRep windows between distractor conditions, the GLMM was performed on the NoDis and Dis1 conditions, only (same time-frame for AntRep in these two conditions).

## F. Distribution of behavioral responses made after the target occurrence



**Fig. A6 | Behavioral responses made after target according to age.** **a.** Missed responses percentage as function of the age. **b.** Late responses percentage as a function of the age. For a and b: within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on each side.

## G. Distribution of behavioral responses made before the target occurrence



**Fig. A7 | Behavioral responses made before target according to age.** **a.** Cue responses percentage as function of the age. **b.** Random responses percentage as a function of the age. **c.** Distractor responses percentage as a function of the age. **d.** Anticipated responses percentage as a function of the age. For a, b, c and d: within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on each side.

## 1. Title

### **Brain markers of distractibility in children: dissociated developmental trajectories of Top-Down and Bottom-Up attention mechanisms.**

Hoyer R.S.<sup>1</sup>, Masson. M.<sup>1</sup>, Bidet-Caulet A<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> *Lyon Neuroscience Research Center (CRNL), INSERM UMRS 1028, CNRS UMR 5292, Université Claude Bernard Lyon 1, Université de Lyon, Lyon, France*

## 2. Introduction

You might have noticed how easy it is to distract a child: introduction of a new toy in the playground can lead children to abandon their current play, a single laugh can instantly distract an entire classroom of pupils or a simple animal sticker can sometimes fade big griefs. It is then widely agreed that, compared to adults, children's attention is naturally driven by distracting events. "Distractibility" and "distraction" are commonly used interchangeably to designate a similar construct. Here, we propose that distractibility is a state underlined by an interaction between several attention components allowing to select relevant events while staying alert to the surroundings, but without been constantly distracted. Conversely, distraction designates an irrelevant event effect on ongoing brain processes or behavioral performances.

Attention is a multifaceted function. It is assumed to rely on dissociated, but interdependent, neural networks. Attention can be endogenously oriented toward relevant objects through Top-Down (TD) brain mechanisms. TD processes are supported by a dorsal fronto-parietal network including the intraparietal sulcus and the frontal eye fields. By contrast, attention can also be exogenously captured by a salient and unexpected irrelevant event (i.e. a distractor) through Bottom-Up (BU) brain mechanisms. This BU orientation of attention is supported by a ventral fronto-parietal network, including the

temporo-parietal junction and the ventral frontal cortex. Furthermore, TD and BU attention networks overlap within the lateral prefrontal cortex, allowing TD and BU processes to interact. Activation of dorsal and ventral attention networks has notably been observed using functional Magnetic Resonance Imaging and magnetoencephalography (MEG) recordings (Corbetta et al., 2008; Elshafei et al., 2020; ElShafei et al., 2019; Fox et al., 2006).

During target expectancy in adults, the deployment of TD processes is notably observable through evoked response potentials (ERPs) such as the Contingent Negative Variation emerging at frontal sites in response to cues indicating an upcoming target (Bidet-Caulet et al., 2015; Brunia, 1999; Brunia & van Boxtel, 2001; Gómez et al., 2004; W Grey Walter et al., 1964), and the N1, P2 (e.g. Bidet-Caulet et al., 2007; Eason et al., 1969; Hillyard, 1973; Picton & Hillyard, 1974; Slagter et al., 2016) and P3b (Bidet-Caulet et al., 2015; Desmedt et al., 1965; Golob et al., 2002; Sutton et al., 1965) responses to targets. Deployment of BU processes is investigated in response to distractor. A P3 complex with frontal, central and parietal contributions, (also called P3a or novelty-P3) is believed to index novelty detection, involuntary orienting of attention and phasic arousal (review in Escera et al., 2000; Masson & Bidet-Caulet, 2019). When attention is involuntarily captured, it can be reoriented back toward the relevant event (i.e. the target) through TD processes. The reorienting negativity (RON) response with a frontal distribution, following the P3 complex, is suggested to index attention reorientation (Escera et al., 2003; Escera & Corral, 2007; Horváth, et al., 2008, 2009).

Brain regions follow different development trajectories during childhood with temporal areas maturing earlier than frontal ones (Gogtay, et al., 2004; Huttenlocher & Dabholkar, 1997; Tau & Peterson, 2010). To that extent, the N1 and P2 auditory responses have been found to be mature quite early during childhood. The N1 response is observable around 10 years of age ; before this age, auditory processing indexed by the N1 is still maturing and is indexed by a positive P1 response (Bishop et al., 2007; Ceponiene et al., 2004; Karns et al., 2015; Sharma et al., 1997; Anu Sharma et al., 2005). The P2 auditory response has also been observed in children of 10 years of age (Karns et al., 2015), while the N250 is predominant in younger children (Ceponiene et al., 1998; Korpilahti & Lang, 1994; Kurtzberg et al., 1995; Shafer et al., 2000).

On the contrary, ERPs involved in BU or TD attention seem to mature later during adolescence or early adulthood, in line with frontal contribution to these responses. Overall, the CNV amplitude has been found increasing through childhood and adolescence



(Bender et al., 2005; Jonkman, 2006; Timsit-Berthier & Hausman, 1972). The CNV response presents 2 components: the early and late CNV which have been respectively associated to anticipatory attention and motor preparation. These components would follow different developmental trajectories, with the late CNV maturing earlier, around 9 years of age (Bender et al., 2005; L. M. Jonkman et al., 2003; Sidney J. Segalowitz et al., 1992), while the early component would be progressively developing between 6 and 17-years-old (yo) (Jonkman et al., 2003; Perchet & Garcia-Larrea, 2005; Perchet & Garcia-Larrea, 2000; Segalowitz et al., 1992; Thillay et al., 2015). The development of the CNV through childhood is also characterized by changes in its scalp topography: starting from age 12, the CNV scalp distribution is maximal over frontal electrodes, but it is more scattered over frontal and parietal areas before this age (Bender et al., 2005; Padilla et al., 2014; Tecce, 1971; Thillay et al., 2015).

An increase in amplitude of the P3b to target during childhood has been consistently reported in the literature. Furthermore the P3b amplitude to auditory targets matures earlier in childhood than the P3b to visual targets (Riggins & Scott, 2020; Segalowitz, Santesso, & Jetha, 2010). Similarly to adults, an increased P3b amplitude to relevant compared to irrelevant stimuli can be observed during childhood (Goodin et al., 1978; Riggins & Scott, 2020; Sanders & Zobel, 2012). The P3b topography shifts from a diffused central and parietal distribution to a focused parietal distribution from childhood to adulthood (Segalowitz & Davies, 2004; Stige et al., 2007; Thomas & Nelson, 1996).

An adult like P3a complex would be observable in school-aged children in response to distracting sounds (Ceponiene et al., 2004; Courchesne, 1978; Cycowicz et al., 1997; Gumenyuk et al., 2001, 2004; Wetzel et al., 2006, 2011; Wetzel & Schröger, 2014). Similarly to adult, the P3a complex is increased in response to highly rather than simple deviant stimuli in children from 6 to 12yo (Wetzel et al., 2006). Some past studies have reported that the latency of the P3a complex progressively decreases from 5 to 13yo (Courchesne, 1978; Cycowicz et al., 1996; Gumenyuk et al., 2001, 2004; Kihara et al., 2010), while others do not show any modulation of the P3a latency with age (Horváth et al., 2009; Ruhnau et al., 2010, 2013). Additionally, the P3a topography would be more important at frontal sites during childhood (Brinkman & Stauder, 2008; Ceponiene et al., 2004; Määttä et al., 2005; Wetzel et al., 2011; Wetzel & Schröger, 2007, 2014).

The RON has been much less investigated in children than the previously evoked responses (Wetzel & Schröger, 2014). The few results available suggest that an adult looking like RON can be observed starting from 6 years of age (Mikkola et al., 2010; Wetzel et al., 2004), but its latency would be progressively shortened from 6 to 12yo (Horváth et

al., 2009; Ruhnau et al., 2010; Wetzel et al., 2006). Similarly to the RON in adults, children show diminished RON amplitude if the irrelevant event was preceded by an informative cue (Horváth et al., 2011; Sussman et al., 2003; Wetzel et al., 2006),

In summary, distractibility relies on a balance between TD and BU processes which seem to follow different maturation timelines during childhood.

### **The present study.**

In children, TD and BU attention have mostly been studied with experimental paradigms designed to separately assess their effects on the brain and behavior. The present study thus aims to identify the brain correlates and dynamics of several attention components underpinning the behavioral expression of distractibility from school age to adulthood.

To explore the brain development of distractibility, the present study uses an adaptation of the Competitive Attention Test (CAT) paradigm that we previously employed in a behavioral study in children from 6 to 17yo (Hoyer et al., 2019). This study has highlighted important changes in the behavioral manifestations of distractibility between 6, 10-13 and 18-25 years of age. To investigate the brain functioning differences underpinning such behavioral changes along childhood, the EEG brain responses to relevant and unexpected rare irrelevant events have been investigated in children of 6 and 11-13 years of age and in adults. The CNV and P3b to targets, as well as the P3 complex and the RON to distracting sounds, have been chosen as markers of interest for investigating the brain development of distractibility.

### 3. Methods

#### 3.1. Participants

48 typically developing children and adults were recruited. Data from 4 participants were excluded from the analysis, either because of a correct trial percentage inferior to 50% in the NoDis condition (N=1) or of technical issues (N=3). A total of 44 subjects (86% right-handed, 43% female, 6 to 25 years old) were included in the analysis. Participants were divided into 3 age groups matched in gender and handedness (see Table 1 for a detailed description of the sample by age groups). All the subjects had normal or corrected-to-normal vision, no history of psychiatric or neurological problems, and they were not taking any drug affecting the central nervous system. This study was approved by the French ethics committee Comité de Protection de Personne for testing in adults and children. Written informed consent was obtained from the parents and adults and assent from the adolescents. Adults were paid and children were offered recreational and educational toys as a compensation for participating in the study.

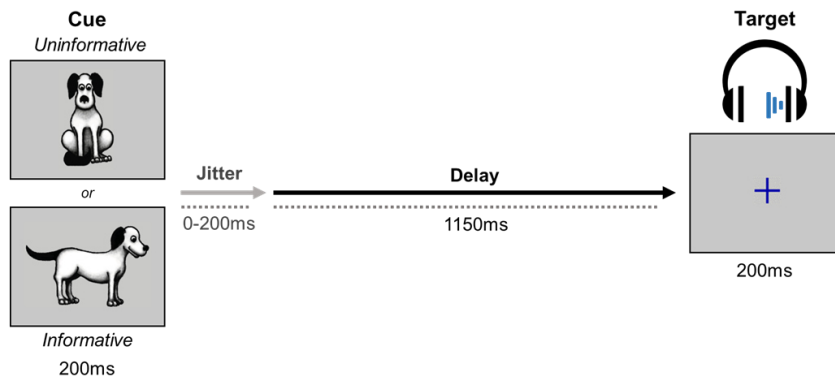
**Table 1 | Characteristics of the population sample.** Detailed samples by age (years and months), gender, handedness, parents' education level, thresholds of auditory perception and standard scores to the WISC- IV (children) and WAIS-IV (adults) ( $\pm$  standard error of the mean, SEM).

| Age (year) | Mean age (month) | Samples  |          | Gender |        | Handedness |       | Mean parents education | Auditory perception threshold (dBA) |                | Standard scores to Wheschler scales' subtests |                |                          |                |                |
|------------|------------------|----------|----------|--------|--------|------------|-------|------------------------|-------------------------------------|----------------|---|----------------|--------------------------|----------------|----------------|
|            |                  | Included | Excluded | Male   | Female | Left       | Right |                        | Left ear                            | Right ear      | Block design                                  | Similarities   | Letter-Number sequencing | Coding         | Symbols        |
| 6          | 76.1 $\pm$ 1.0   | 14       | 1        | 57%    | 43%    | 14%        | 86%   | 4.7 $\pm$ 0.2          | 37.8 $\pm$ 3.3                      | 37.3 $\pm$ 3.3 | 13.6 $\pm$ 0.8                                | 17.1 $\pm$ 0.6 | 13.5 $\pm$ 0.8           | 11.4 $\pm$ 0.7 | 11.8 $\pm$ 0.9 |
| 11-13      | 135.6 $\pm$ 8.9  | 15       | 0        | 60%    | 40%    | 13%        | 87%   | 3.6 $\pm$ 0.4          | 28.2 $\pm$ 1.9                      | 28.8 $\pm$ 2.0 | 11.2 $\pm$ 0.5                                | 15.4 $\pm$ 0.8 | 10.3 $\pm$ 0.7           | 11.4 $\pm$ 0.7 | 12.1 $\pm$ 0.8 |
| 18-25      | 266.1 $\pm$ 6.2  | 15       | 0        | 53%    | 47%    | 13%        | 87%   | 3.2 $\pm$ 0.4          | 26.8 $\pm$ 1.8                      | 26.8 $\pm$ 1.9 | 11.1 $\pm$ 0.9                                | 14.8 $\pm$ 0.5 | 12.9 $\pm$ 0.7           | 12.1 $\pm$ 0.7 | 12.6 $\pm$ 0.9 |

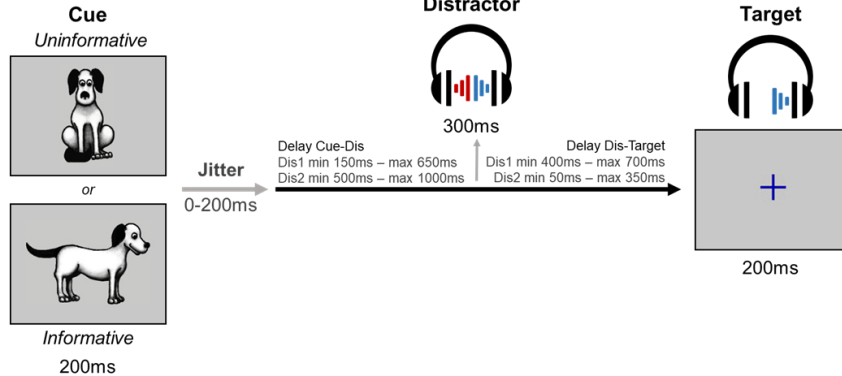
#### 3.2. Stimuli and task

Participants were instructed to keep their eyes fixated on a blue cross presented at the center of a grey background screen during the task (within and between trial events). 62.5% of the trials consisted of a visual cue (200-ms duration) followed, after a delay jittered between 1150 and 1350 ms, by a 200-ms duration target sound (Fig. 1a). The cue was presented centrally on the screen and could either be a dog facing left, right, or front. The target sound was a dog barking monaurally presented at 15 dB SL (around 65 dBA) in headphones. The trial structure was identical, for the other 37.5% of the trials, but a binaural distracting sound (300-ms duration) was played during the delay period (Fig. 1b) at 35 dB SL (around 75 dBA). A total of 48 different distracting sounds were used (phone ring, clock-alarm, etc.) for each participant. Distractor occurred at a random time within 2 different periods: 700-1000 ms (Dis1) or 350-650 ms (Dis2) before target onset (Fig. 1b).

**a. Trial without distractor**



**a. Trial with distractor**



**Fig. 1 | Protocol. a.** In uninformative trials, a facing-front dog was used as a visual cue (200 ms duration), indicating that the target sound will be played in either the left or right ear. In informative trials, a facing left or right dog visual cue (200 ms duration) indicated in which ear (left or right, respectively) the target sound will be played (200 ms duration) after a first jittered delay (0-200 ms) and a second fixed delay (1150 ms). **b.** In trials with distractor the task was similar, but a binaural distracting sound (300 ms duration) - such as a phone ring - was played during the delay between cue and target. The distracting sound could onset 700-1000 ms (Dis1) or 350-650 ms (Dis2) before target onset.

The proportion of cue categories (informative, uninformative) and target categories (Left, Right) were distributed equiprobably between no-distractor and distractor trials. The informative condition represented 50% of the trials: in that case the dog was facing left or right, indicating the ear of the target sound presentation (25% left and 25% right). The uninformative condition represented 50% of the trials: the facing-front dog was followed by the target sound in the left (25%) or right (25%) ear.

Participants were instructed to perform a detection task by pressing a key as fast as possible when they heard the target sound (dog bark). They were asked to focus their attention to the cued side. Participants were informed that informative cues were 100% predictive and that a distracting sound could sometimes occur during the cue-target delay. Subjects had 3000 ms to answer after target sounds. If the participant did not answer within this 3000 ms period after the target onset, a fixation cross was presented for a randomized period of 1700 ms to 1900 ms.

To compare behavioral responses to acoustically matched sounds, the same distracting sounds were played for each distractor condition (Dis1 or Dis2) in each cue condition. Each distracting sound was played 4 times during the whole experiment, but no more than once during each single block to limit habituation.

### 3.3. Procedure

Data from the present study were collected during two visits at the laboratory.

#### ***Visit 1: Questionnaires and psychometric assessment***

Adults and parents of children enrolled in the study filled out a short questionnaire about their socio-economic characteristics. They respectively completed the Adult Self-Report Scale (ASRS) and the Attention-Deficit Hyperactivity Disorder Rating Scale IV (ADHD RS) questionnaires, both assessing symptoms of ADHD in adults and children according to the diagnostic criteria of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. To assess the probability that participants could suffer from sleep problems, adults filled out the Epworth sleepiness scale (ESS) and parents of children filled out the Sleep Disturbance Scale for Children (SDSC).

To control for any difference in global cognitive efficiency in child and adult participants, a short cognitive assessment was conducted during the first visit. WISC-IV and WAIS-IV subscales were used to measure cognitive global efficiency in children and adults, respectively. More precisely, Similarities subscale was used as an indicator of Verbal Comprehension; Block Design subscale as an indicator of Perceptual Reasoning; Sequencing as an indicator of Working Memory; and finally, Codes and Symbols as indicators of Processing Speed. Raw scores in the aforementioned subtasks were transformed in standard scores using the WISC and WAIS calibration tables.

All participants were also tested with an audiometry to verify that they no hearing problem.

The first visit of this study lasted one hour and a half, breaks included.

#### ***Visit 2: EEG testing***

EEG was recorded from 64 active scalp electrodes mounted in an electrode-cap (Biosemi, The Netherlands) following a sub-set of the extended International 10–10

System. 4 additional electrodes were used for horizontal (external canthi locations) and vertical (left supraorbital and infraorbital ridge locations) EOG recording and two other electrodes were placed on earlobes. Data were amplified ( $-3$  dB at  $\sim 819$  Hz low-pass, DC coupled), digitized (1024 Hz), and stored for offline analysis. Data were re-referenced offline to the average potential of the two earlobe electrodes.

Subjects were seated in a comfortable armchair in a sound attenuated and electrically-shielded room, at 1 m distance from the screen. All stimuli were delivered using the Presentation software (Neurobehavioral Systems, Albany, CA, USA). Sounds were delivered through earphones. First, the auditory threshold was determined for the target sound, in each ear, for each participant using the Bekesy tracking method. This resulted in an average target threshold across subjects of  $31 \pm 1.1$  dBA (see Table 1 for details by age range). Then, the experimenter gave verbal instructions to the participants about the CAT. Participants performed a short training of the task followed by 16 3-min blocks of 32 pseudo-randomize trials each. The order of the 16 blocks was randomized through participants using a Latin square. EEG was recorded while subjects performed the 16 blocks.

During experiment sessions with children, a researcher was sitting next to the participant. To make sure that the 6 and 11-13yo children were looking at the screen during the whole experiment, a small camera was placed next to the screen, allowing the researcher to check for children's eyes. Every 2 blocks, images of the gifts which could be won at the end of the test were given to the 6yo children. Short breaks were systematically performed every 4 blocks in 6 to 13yo children.

The second visit of this study lasted around two hours and a half in children, and one hour and a half in adults, breaks included.

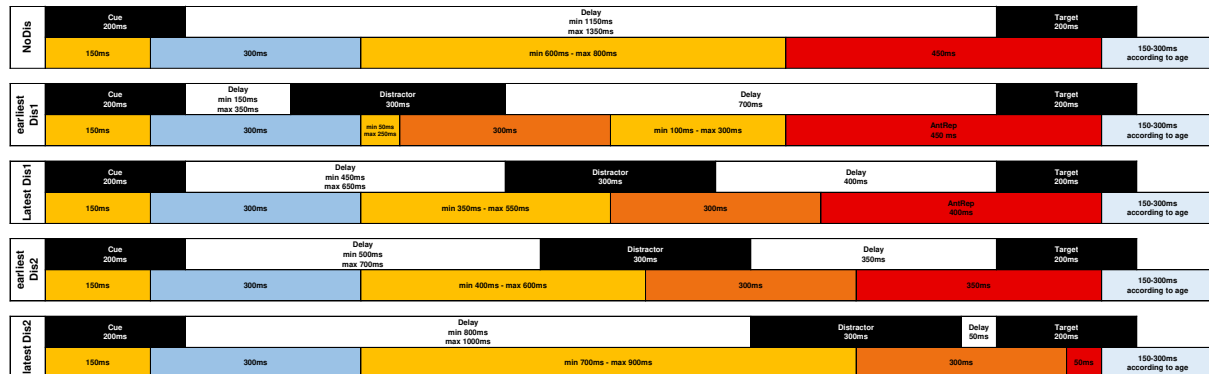
### **3.4. Behavioral data analysis**

We used a custom MATLAB program to extract and preprocess behavioral data.

Based on results from a large scale study performed using the CAT (Hoyer et al., 2019), RT limits for correct responses were used to consider the overall brain maturation effect on speed processing. The shortest reaction time for a correct response (RT lower limit) was calculated for each age range (see Fig. S2 and Appendix S2) and was fixed at 300 ms for 6yo children and 150 ms for 11-13yo and adults. For each participant, the longest

reaction time for a correct response (RT upper limit) was calculated from all RT > 0ms using the Tukey's method of leveraging the Interquartile Range.

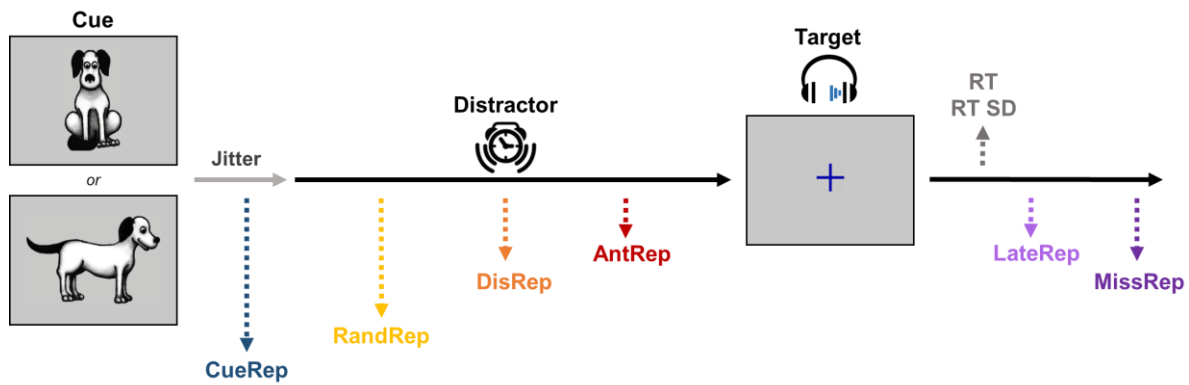
False alarm responses were categorized based on the timing depicted in Fig. 2. The timing for categorizing the behavioral responses in distractor trials is provided for the earliest and latest possible occurrence of each distractor (see Fig. S1 Sup. Info. A) for a detailed timing of behavioral response categorization).



**Fig. 2 | Timeline for the behavioral response categorization of false alarms during the CAT trials.** From top to bottom: NoDis, Dis1: earliest time of occurrence, Dis1 latest time of occurrence, Dis2 earliest time of occurrence and Dis2 latest time of occurrence. The superior row depicts the timing of the task related events (cue, distractor and target); the inferior row shows the category in which the behavioral response is assigned based on its timing of occurrence. The timing for the cue responses categorization is depicted in blue; the timing for the distractor responses categorization is depicted in orange; the timing for the anticipated responses categorization is depicted in red; the timing for the random responses categorization is depicted in yellow.

Hence, (i) responses before the RT lower limit were considered as a part of the false alarm response type; (ii) responses between the lower and the upper RT limits were considered as correct responses; (iii) responses after the RT upper limits were considered as late responses.

To investigate the diversity of behaviors observed during the task, further analyses addressed 8 behavioral measures: RT (ms), RT standard deviation (RT SD; ms), missed responses (MissRep; %), late responses (LateRep; %), cue responses (CueRep; %), random responses (RandRep; %), distractor responses (DisRep; %) and anticipated responses (AntRep; %). A simplified schematic representation of the timing used for sequencing behavioral responses is proposed in Fig. 3, but see Fig. S1 Sup. Info. A for detailed parameters.



**Fig. 4 | Schematic timeline for the behavioral response categorization during the CAT trials.** CueRep: responses to cues, DisRep: Responses to distractors, AntRep: anticipated responses, RandRep: random responses, RT:reaction times, RT SD:standard error of positive RT, LateRep: late responses and MissRep: missed responses.

### 3.5. EEG data

EEG data were band-pass filtered (0.1–40 Hz). Prior to ERP analysis, eye-related activities were detected using independent component analysis (ICA) and were selectively removed via the inverse ICA transformation. Only 1, 2 or 3 ICs were removed in each participant. Trials including false alarms (CueRep, RandRep, DisRep or AntRep), undetected target, and trials contaminated with excessive muscular activity were excluded from further analysis. ERPs were averaged for each stimulus event: cue-related potentials (CueRPs) were averaged locked to cue onset in trials including correct responses and LateRep; distractor-related potentials (DisRPs) were averaged locked to distractor onset in trials including correct responses, LateRep and MissRep; finally, target-related potentials (TargetRPs) were averaged locked to target onset in trials including correct responses and LateRep. The numbers of considered trials (across subjects and within each age ranges) for analysis are reported in Table 2. Different baseline corrections were applied according to the investigated processes. To investigate the deployment of top-down attention mechanisms in the absence of distracting sound (NoDis), CueRPs were baseline corrected to the mean amplitude of the -100 to 0 ms period before cue onset, and TargetRPs were corrected to the mean amplitude of the -100 to 0 ms period before target onset.

**Table 2 | Detailed samples of EEG trials used for analysis.** Mean number of trials used for CueRPs (NoDis), DisRPs (Dis1 and Dis2) and TargetRPs analysis according to cue the condition and the age ( $\pm$  standard error of the mean, SEM).



| Age   | Cue               |                     | Distractor 1 and 2 |               | Target      |               |
|-------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------|-------------|---------------|
|       | NoDis Informative | NoDis Uninformative | Informative        | Uninformative | Informative | Uninformative |
| 6     | 110.2 ± 6.9       | 111.0 ± 6.6         | 62.7 ± 4.1         | 63.4 ± 4.5    | 181.5 ± 9.7 | 181.2 ± 10.0  |
| 11-13 | 138.5 ± 3.7       | 142.4 ± 2.8         | 73.2 ± 1.3         | 75.7 ± 3.5    | 210.5 ± 8.3 | 217.8 ± 7.3   |
| 18-25 | 154.2 ± 1.2       | 156.5 ± 1.2         | 89.2 ± 0.8         | 88.9 ± 1.4    | 244.5 ± 1.9 | 245.8 ± 1.7   |

To analyze ERPs to distracting sounds, for each distractor onset time-range, surrogate DisRPs were created in the NoDiS trials and subtracted from the actual DisRPs. The obtained DisRPs were then baseline corrected to the mean amplitude of the -100 to 0 ms period and thus cleared of cue-related activity.

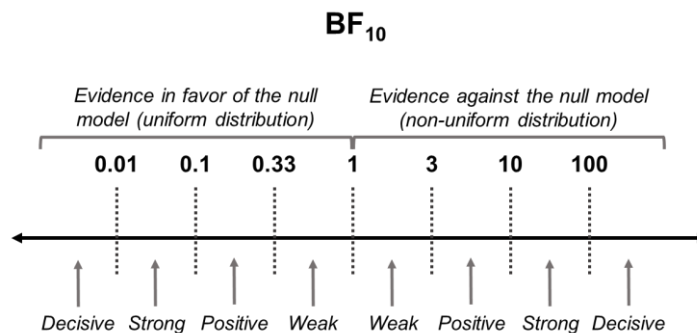
ERP scalp topographies were computed using spherical spline interpolation (Perrin et al. 1989). ERPs were analyzed using the software package for electrophysiological analysis (ELAN Pack) developed at the Lyon Neuroscience Research Center (elan.lyon@inserm.fr; Aguera et al. 2011).

### 3.6. Statistical analyses.

#### **Sample characteristics analysis.**

In order to test the similarity between measures or to estimate a degree of logical support or belief regarding specific results, Bayesian statistics were used.

To confirm that our sample population was similarly distributed across age ranges in handedness, gender, socio-economic status and education level of the participants' parents (in both children and adults), we performed Bayesian contingency table tests. We reported Bayes Factor ( $BF_{10}$ ) as a relative measure of evidence (Lee & Wagenmakers, 2013). The strength of evidence in favor of, or against the null model (uniform distribution) was inferred as depicted in Fig. 5.



**Fig. 5 | Interpretation of the strength of evidence in favor of or against the null model.** A  $BF_{10}$  lower than 1 supports evidence in favor of the null model, while  $BF_{10}$  higher than 1 supports evidence against the null model. According to the  $BF_{10}$  value, the strength of evidence can be either weak, positive, strong or decisive.

Statistical analyses of hearing threshold are presented in Appendix B.

Bayesian statistics were performed using JASP® software (JASP Team (2018), JASP (Version 0.9) [Computer software]).

### ***Behavioral data analysis.***

To estimate physical tendencies linked to the behavioral measurements, we used generalized linear mixed models (GLMM) in a frequentist approach.

We expected a large between-individual variability in RT and response type rates according to conditions. Performances between-subjects and experimental conditions were defined as effects with a random intercept and slopes, thus instructing the model to correct for any systematic differences in variability between the subjects (between-individual variability) and condition (between-condition variability). To confirm the need for mixed nested models, we used a likelihood ratio analysis to test the model fit before and after sequential addition of random effects. We used the Akaike Information Criterion and the Bayesian Information Criterion as estimators of the quality of the statistical models generated (Matuschek et al., 2017). To optimize our model, we checked the normality of the model residual.

RT and RT SD were log-transformed at the single trial scale to be better fitted to a linear model with Gaussian family distribution. Response types were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation.

To assess the impact of the manipulated task parameters (cue information and distractor type) and of participant age, on each type of behavioral measure we analyzed the influence of three possible fixed effects (unless specified otherwise in Appendix C):

- 1) between-subject factor AGE: 3 levels (see Table 1);
- 2) within-subject factor CUE and CUELRN: 2 levels (CUE: informative vs. uninformative) for measures recorded after the target onset (Hit, LateRep and MissRep) and 3 levels (CUELRN: left, right and neutral) for the measures recorded before the target onset (CueRep, RandRep, DisRep and AntRep);
- 3) within-subject factor DISTRACTOR: 3 levels (NoDis, Dis1 and Dis2), except for DisRep: 2 levels (Dis1 and Dis2).

For post-hoc analysis of the DISTRACTOR by AGE interaction on RT, we planned to analyze two specific measures of the distractor effect: the distractor occurrence (median RT > 0 in NoDis minus median RT > 0 in Dis1) and the distractor position (median RT > 0 in Dis3 minus median RT > 0 in Dis1). Based on previous results (Bidet-Caulet et al., 2015; Masson & Bidet-Caulet, 2019), these differences can be respectively considered as good approximations of the facilitation and detrimental distraction effects triggered by distracting sounds (see Fig. S4). We first performed Shapiro tests to estimate the normality of the arousal and distraction effects. Planned non-parametric Kruskal-Wallis tests with the AGE as between-subject factor were applied to these measures when the data were not normally distributed. When the Kruskal-Wallis test revealed a significant effect of the AGE, we performed non-parametric paired Nemenyi post-hoc tests to identify developmental stages across age ranges.

Normality check and non-parametric statistics were performed in R® 3.4.1 using the stats (R Core Team, 2017) and DescTools (Andri Signorell et mult. al., 2019) packages.

A summary of the data and factors used in statistical modeling can be found in Table 3. Please note that for response types only 2-way interactions were considered as data were sometimes scarce.

**Table 3 | Main statistical analyses according to behavioral response types.** Experimental conditions, factors and models used as a function of the behavioral measurement. Detailed factor levels: CUE: informative vs. uninformative; CUELRN: left, right and neutral; Block = first, second, third and fourth. GLMM = Generalized Linear Mixed Model.

| Response type         | Condition(s) used for response type calculation | Fixed factor(s)  |                    | Random factor        | Distribution fitting |
|-----------------------|---|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
|                       |   | Between subjects | Within subjects    |                      |                      |
| RT (log)              | NoDis vs. Dis1 vs. Dis2                         | Age              | Cue, Distractor    | Distractor + Subject | Gaussian             |
| RT SD (log)           | NoDis   | Age              | Block              | Subject              | Gaussian             |
| Late responses        | NoDis vs. Dis1 vs. Dis2                         | Age              | Cue, Distractor    | Subject              | Binomial             |
| Missed responses      | NoDis vs. Dis1 vs. Dis2                         | Age              | Cue, Distractor    | Subject              | Binomial             |
| Cue responses *       | NoDis & Dis1 & Dis2                             | Age              | CueLRN             | Subject              | Binomial             |
| Distractor responses  | Dis1 & Dis2                                     | Age              | CueLRN             | Subject              | Binomial             |
| Anticipated responses | NoDis vs. Dis1                                  | Age              | CueLRN, Distractor | Subject              | Binomial             |
| Random responses      | NoDis & Dis1 & Dis2                             | Age              | CueLRN             | Subject              | Binomial             |

We ran a type II analysis of variance. Wald chi-square tests were used for fixed effects in linear mixed-effects models (Fox & Weisberg, 2018). We only considered the explanatory variables. The fixed effect represents the mean effect across all subjects after correction of variabilities. Frequentist models and statistics were performed in R® 3.4.1

using the lme4 (Bates et al., 2015) and car (Fox & Weisberg, 2018) packages. We considered results of main analyses significant at  $p < .05$ .

When we found a significant main effect or interaction - and did not plan ahead for specific post-hoc analysis - Post-hoc Honest Significant Difference (HSD) tests were systematically performed using the emmeans package (emmeans version 1.3.2). P-values were considered as significant at  $p < .05$  and were adjusted for the number of performed comparisons.

In the Results section, we reported the SEM as the estimator of the distribution dispersion of the measures of interest, when not specified.

### ***ERP analysis***

In a preliminary approach, to investigate the deployment of top-down attention mechanisms in the absence of distracting sound, the CUE information effect was measured on CueRPs and TargetRPs using permutation tests, in each age group separately. Permutation tests based on randomization (Edgington 1995) were used. Each randomization consisted in (1) the random permutation of the  $n$  pairs ( $n$  corresponding to the number of subjects in the tested group) of values, (2) the sum of squared sums of values in each of the two obtained samples, and (3) the computation of the difference between these two statistic values. We performed 10,000 such randomizations to obtain an estimate of the distribution of this difference under the null hypothesis. We then compared the actual difference between the values in the two conditions of interest to this distribution. CUE effects were measured on the mean amplitude of the CueRPs in successive 50 ms time-windows, from 550 to 1,350 ms post-cue onset at Cz electrode. Post-target CUE effects were measured on the mean amplitude of the transient TargetRPs in successive 10 ms time-windows, from 0 to 200 ms post-target onset at Fz, Cz and Pz electrodes. Post-target CUE effects were measured on the mean amplitude of the slower TargetRPs in successive 50 ms time-windows, from 200 to 800 ms post-target onset at Fz, Cz and Pz electrodes. To correct for multiple testing in the temporal dimension, we used a randomization procedure (Blair & Karniski, 1993) to estimate the minimum number of consecutive time-windows that must be significant for the effect to be globally significant in the entire time-window of interest.

To explore the effect of AGE on distracting sound processing, we selected a disRP with a similar topography across ages, namely the RON. This response starting around 400ms

can be correctly analyzed in response to early distractors only (it is superimposed to TargetRPs in the case of late distractor). We tested the effect of age on the RON amplitude to early distractors in an early and a late time-window (400-500 and 550-650 ms post-distractor onset) using non-parametric Kruskal-Wallis tests. Post-hoc non-parametric Mann-Whitney tests were used for two by two comparison testing of potential significant effect of age from the Kruskal-Wallis analysis.

## 4. Results

### 4.1. Sample characteristics

Using Bayesian contingency table tests, we found a positive evidence for a uniform distribution of gender ( $BF_{10} = 0.20$ ) across ages, and a strong evidence for a uniform distribution of handedness types ( $BF_{10} = 0.08$ ) across ages. We observed a positive evidence for a uniform distribution of parent's socio-economic status across age ranges ( $BF_{10} = 0.03$ ). A strong evidence for a non-uniform distribution of parent's education level across age range was also found ( $BF_{10} = 40.76$ ) indicating that the parents of 6yo children present a higher education level than in the other age groups.

Bayesian ANOVAs reported a weak evidence for a non-uniform distribution of WISC and WAIS standard scores across age ranges for the Similarities ( $BF_{10} = 1.58$ ) and Block design ( $BF_{10} = 1.74$ ) tasks; more precisely, those results indicate that, for both of these tasks, the 6yo group has higher scores than their older peers and adults. By contrast, we observed a weak evidence for a uniform distribution of Letter-number sequencing ( $BF_{10} = 0.32$ ), Coding ( $BF_{10} = 0.21$ ) and Symbols ( $BF_{10} = 0.19$ ) scores across age groups.

### 4.2. Behavioral data

For each type of behavioral measurement, we analyzed the influence of AGE, CUE and DISTRACTOR factors (unless specified otherwise in the Table 3). In the following, when a factor was involved in a main effect and a higher order interaction, we only specified the post-hoc analysis related to the interaction.

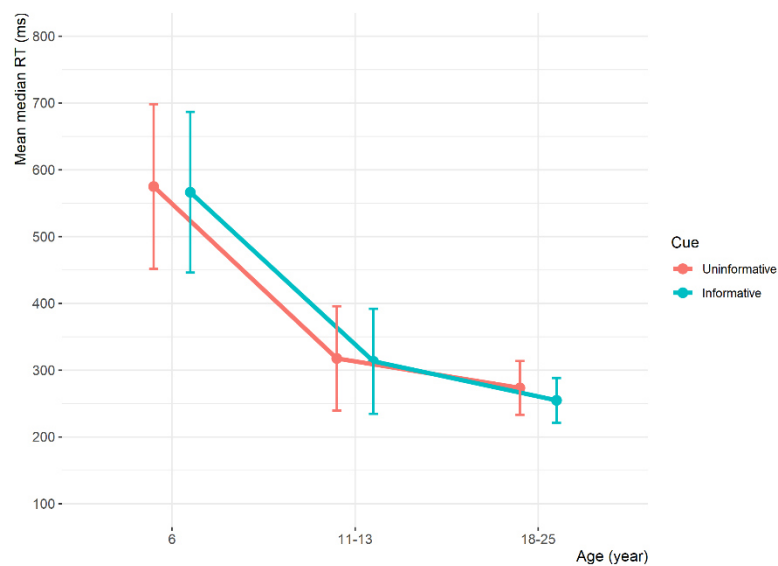
#### *i. RT.*

RT were modulated by AGE ( $\chi^2(2) = 129.5$ ;  $p < .001$ , Fig. S2a Sup. Info. D), CUE ( $\chi^2(1) = 56.1$ ;  $p < .001$ ) and DISTRACTOR ( $\chi^2(2) = 207.5$ ;  $p < .001$ ).

A DISTRACTOR by CUE interaction was found significant ( $\chi^2(2) = 15.4$ ;  $p < .001$ ). Post-hoc HSD tests showed that, in the NoDis condition, participants were faster to detect targets in informative ( $404.2 \pm 25.6$  ms) than uninformative ( $404.2 \pm 25.6$ ms;  $p < .001$ ) cue condition, while no cue effect was found in the Dis1 and Dis2 conditions ( $p = .134$  and  $p = .925$ , respectively). Irrespective of the cue condition, participants were slower in NoDis ( $416.7 \pm 18.3$  ms) compared to Dis1 ( $341.1 \pm 14.8$  ms;  $p < .001$ ) and Dis2 ( $379.8 \pm 16.3$ ms;

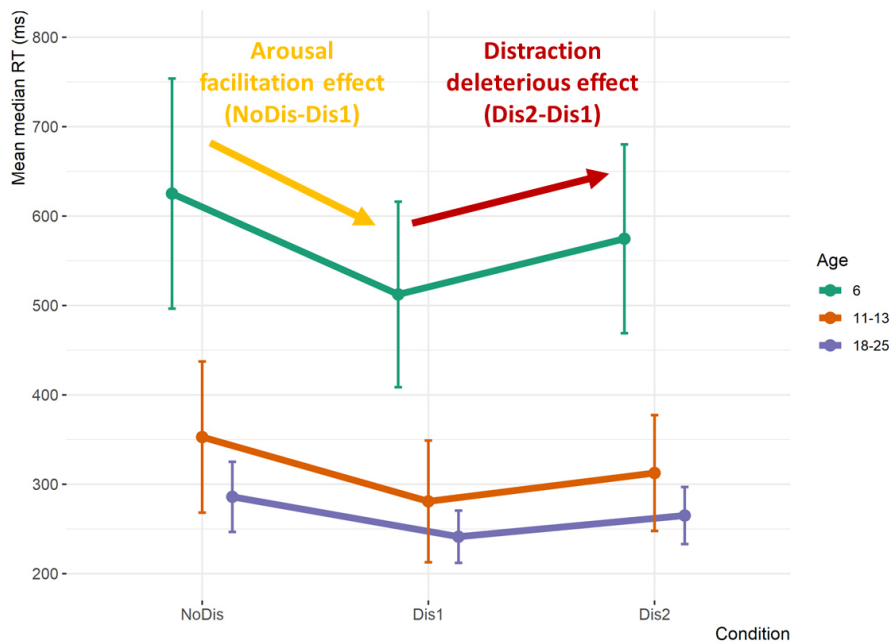
p <.001) conditions; participants also exhibited increased RT in Dis2 compared to Dis1 condition (p <.001).

A CUE by AGE interaction was found significant ( $\chi^2(2) = 32.8$ ; p < .001, Fig. 6). HSD post-hoc tests showed that participants of 18-25 years of age were faster in informative (254.8 ± 5.1 ms) compared to uninformative trials (273.4 ± 6.4 ms; p < .001), while this difference was not found significant in children. In parallel, the 6yo children were slower than the 11-13 and 18-25yo participants irrespective of the cue condition.



**Fig. 6 | Median RT according to cue and age.** Mean of median reaction time as a function of the cue condition [Informative, Uninformative]. Significant differences and related p values can be found in the RT part, in the Results section. (Error bars represent 1 SEM).

Finally, a DISTRACTOR by AGE interaction was found significant ( $\chi^2(4) = 10.2$ ; p < .05, Fig. 7).



**Fig. 7 | Median RT according to distractor and age.** Mean of median reaction time as a function of the distractor condition [NoDis, Dis1, Dis2, Dis3] in 6, 11-13 and 18-25yo. Significant differences and related p values can be found in the RT part, in the Results section. (Error bars represent 1 SEM).

Planned post-hoc analyses were performed on the RT arousal facilitation and distraction effects. First, a Shapiro-Wilk test indicated that the arousal and distraction effects (see Fig. 7) were not normally distributed ( $W = 0.88$ ;  $p < .001$  and  $W = 0.80$ ;  $p < .001$ , respectively). Post-hoc Kruskal-Wallis tests revealed that the AGE modulated the arousal facilitation effect ( $\chi^2(2) = 13.4$ ;  $p < .01$ ; Fig. S3a Sup. Info D) and the distraction effect ( $\chi^2(2) = 7.4$ ;  $p < .05$ ; Fig. S3b Sup. Info D): both were found larger in the 6yo ( $108.7 \pm 23.1$  ms and  $60.4 \pm 18.2$  ms, respectively) compared to the 18-25yo ( $45.1 \pm 4.8$  ms and  $24.7 \pm 3.9$ , respectively) ( $p < .001$  and  $p < .05$ , respectively). The arousal and distraction effect were not found significantly different between the 11-13yo ( $70.6 \pm 8.7$  ms and  $32.0 \pm 4.5$  ms, respectively) and other age groups.

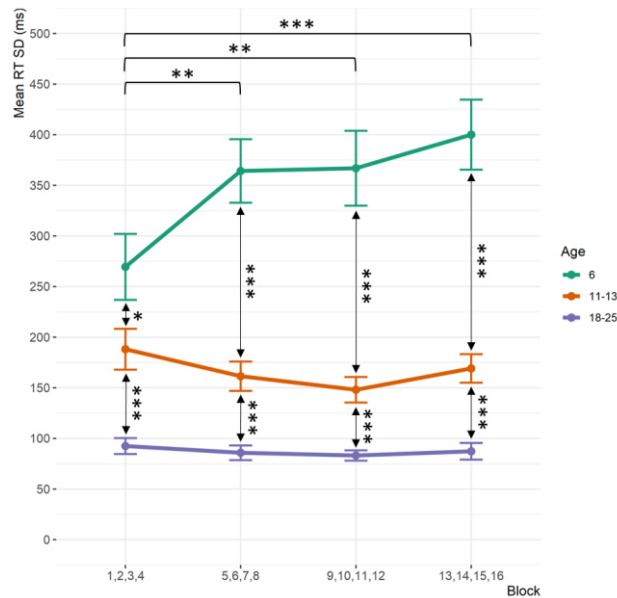
## ii. RT SD.

RT SD was modulated by AGE ( $\chi^2(2) = 174.4$ ;  $p < .001$ ; Fig. S2b).

Additionally, an AGE by BLOCK interaction was significant ( $\chi^2(6) = 27.4$ ;  $p < .001$ ; Fig. 9). HSD post-Hoc comparisons revealed that, in all block conditions, RT variability decreases from 6 to 11-13 to adulthood. Moreover, the 6yo children showed increased RT



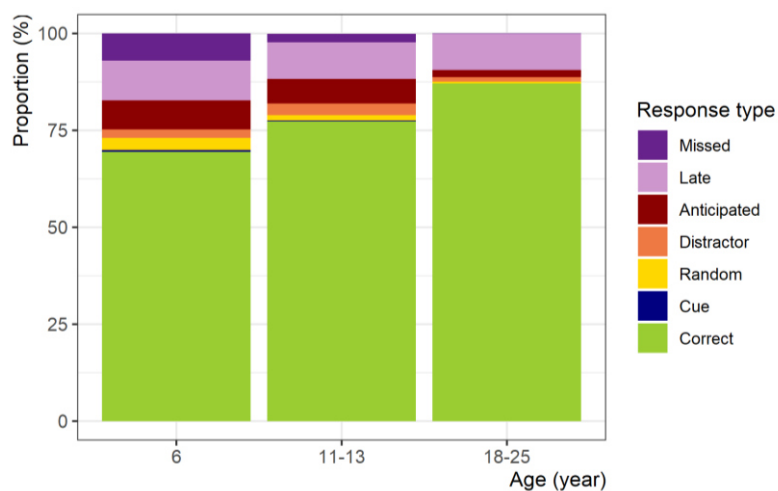
SD in the 12 last blocks of the experiment compared to the 4 first blocks of the experiment; no significant effect of the BLOCK was found in the 11-13- and 18-25yo children.



**Fig. 9 | Mean SD RT according to block and age.** Mean of median reaction time as a function of the block category [1-2-3-4, 5-6-7-8, 9-10-11-12 or 13-14-15-16] by age [6, 11-13 or 18-25 years of age]. Significant differences and related p values can be found in the Median RT part in the Results section. (Error bars represent 1 SEM).

### iii. General accuracy

The distribution of the different types of responses according to age is depicted in Fig. 10. The average correct response rate was  $77.2 \pm 0.1$  %. Significant effects of age on the erroneous response types are detailed in the following.



**Fig. 10 | Response type proportions according to age.**

#### *iv. Missed responses.*

The rate of missed responses (MissRep:  $2.6 \pm 0.3$  %) was modulated by AGE ( $\chi^2(2) = 30.7$ ;  $p < .001$ , Fig. S4a Sup. Info E). HSD post-hoc comparisons indicate that the MissRep rate decreased with age: the 6yo children ( $6.1 \pm 0.7$  %) missed more targets than the 11-13yo ( $1.8 \pm 0.3$  %;  $p < .05$ ) and the 18-25yo ( $0.2 \pm 0.1$  %;  $p < .001$ ); the 11-13yo also missed more targets than the 18-25yo ( $p < .001$ ).

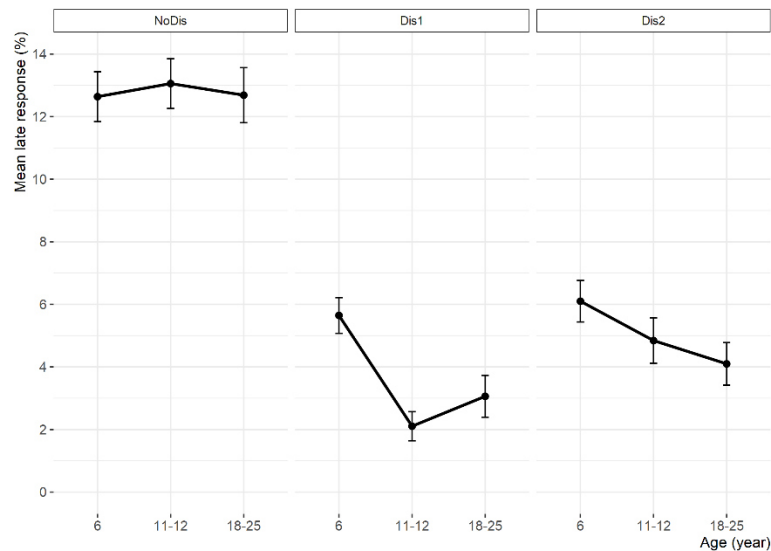
We also observed significant main effects of DISTRACTOR ( $\chi^2(2) = 29.7$ ;  $p < .001$ ). HSD post-hoc analyses reveal that participants showed a higher MissRep rate in NoDis ( $3.5 \pm 0.6$  %) compared to Dis2 condition ( $2.2 \pm 0.5$  %;  $p < .05$ ).

#### *v. Late responses.*

The rate of late responses (LateRep:  $7.1 \pm 0.3$  % on average) was modulated by CUE ( $\chi^2(1) = 34.2$ ;  $p < .001$ ) and DISTRACTOR ( $\chi^2(1) = 376.8$ ;  $p < .001$ ).

We also observed a significant CUE by AGE interaction ( $\chi^2(2) = 25.1$ ;  $p < .001$ ). Post-hoc analysis indicated that the 6 and 18-25yo made more LateRep in uninformative (6yo:  $8.6 \pm 0.8$  %; 18-25yo:  $8.4 \pm 0.9$  %) than informative (6yo:  $7.6 \pm 0.6$  %,  $p < .05$ ; 18-25yo:  $4.8 \pm 0.7$  %,  $p < .001$ ) cue condition, while the 11-13yo exhibited a similar pattern of performances in both the cue conditions. Although the 6 and 18-25yo showed similar LateRep rate in uninformative cue condition, adults made less LateRep than the 6yo children when the cue was informative ( $p < .001$ ).

An interaction between DISTRACTOR and AGE was found significant ( $\chi^2(4) = 28.3$ ;  $p < .001$ ; Fig. 11). HSD post-hoc comparisons indicated that, irrespective of the age, participants made more LateRep in NoDis ( $12.8 \pm 0.5$  %) than Dis1 ( $3.5 \pm 0.4$  %;  $p < .001$ ) and Dis2 ( $4.9 \pm 0.4$  %;  $p < .001$ ) conditions. Additionally, the 6yo made more LateRep in Dis1 condition ( $5.6 \pm 0.9$  %) compared to both the 11-13 ( $2.1 \pm 0.5$  %;  $p < .001$ ) and 18-25yo ( $3.0 \pm 0.7$  %;  $p < .001$ ); by contrast, the children of 6 years of age showed increased LateRep in Dis2 condition ( $6.0 \pm 0.7$  %) only when compared with adults ( $4.1 \pm 0.6$  %;  $p < .001$ ). See also Fig. S4a Sup. Info E for LatRep distribution by age group.



**Fig. 11 | Mean percentage of late responses according to distractor and age.** Mean percentage as a function of the distractor condition [left panel NoDis, middle panel Dis1 and right panel Dis2] by age [6, 11-13 or 18-25 years of age]. Significant differences and related p values can be found in the Late responses part in the Results section. (Error bars represent 1 SEM).

#### *vi. Cue responses.*

The rate of cue responses (CueRep:  $0.2 \pm 0.0$  % on average) was modulated by AGE ( $\chi^2(2) = 9.6$ ;  $p < .01$ ; Fig. 12). Post-hoc analysis revealed that the 6yo children made more CueRep ( $0.4 \pm 0.1$  %) than adults ( $0.0 \pm 0.1$  %;  $p < .01$ ).

#### *vii. Anticipated responses.*

The rate of anticipated responses ( $8.2 \pm 0.7$  % on average) was modulated by AGE ( $\chi^2(2) = 21.3$ ;  $p < .001$ ; Fig. 12). HSD post-hoc analysis showed that the 6yo ( $11.4 \pm 1.4$  %) and 11-13yo ( $10.4 \pm 1.4$  %) children made more AntRep than 18-25yo ( $3.2 \pm 0.6$  %;  $p < .001$  and  $p < .01$ , respectively).

We also found a significant effect of CUE ( $\chi^2(1) = 8.7$ ;  $p < .05$ ) indicating larger AntRep rate in the right ( $8.9 \pm 1.4$  %) compared to uninformative ( $7.5 \pm 1.1$  %) cue condition.

A significant effect of the DISTRACTOR was observed ( $\chi^2(1) = 8.7$ ;  $p < .05$ ). Post-hoc analysis showed that participant had more AntRep in Dis1 ( $14.0 \pm 1.4$  %) than NoDis condition ( $2.4 \pm 0.4$  %).

### *viii. Distractor responses.*

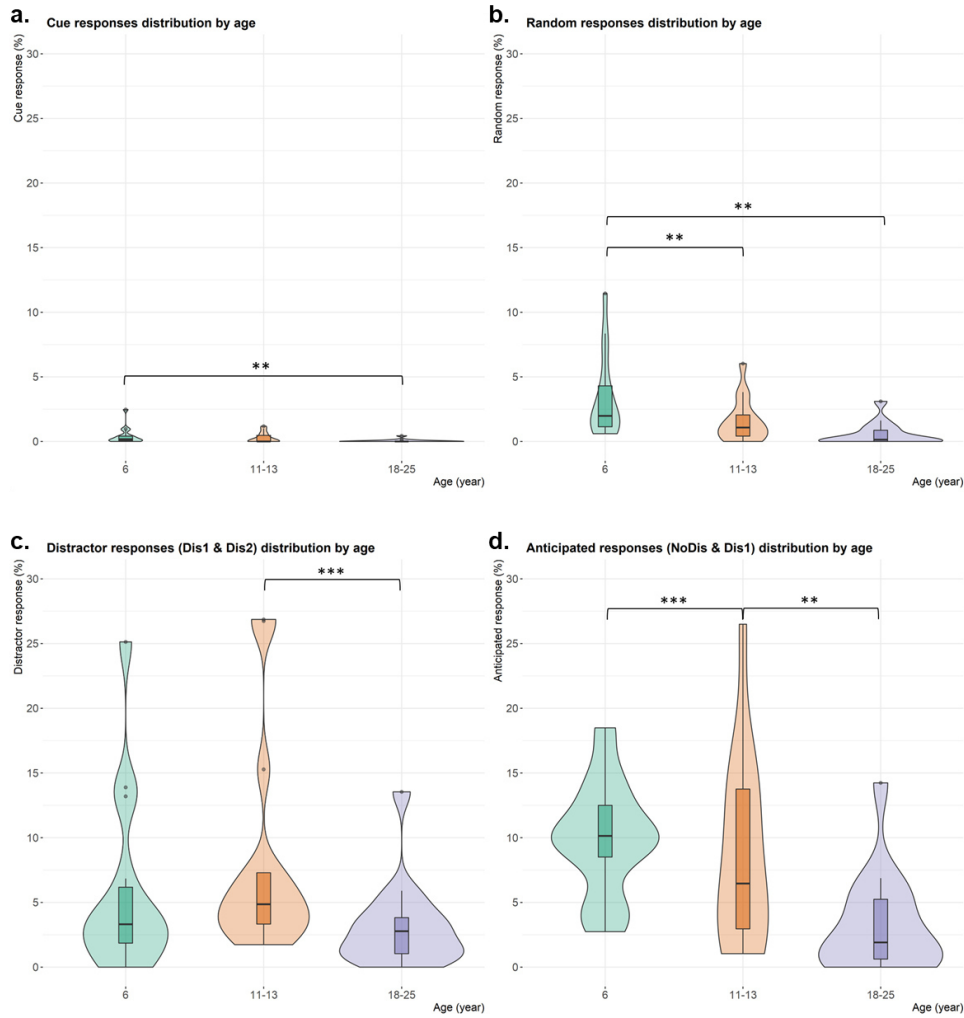
The rate of distractor responses ( $5.7 \pm 0.5$  % on average) was found modulated by AGE ( $\chi^2 (2) = 30.8$ ;  $p < .05$ ; Fig. 12) and DISTRACTOR ( $\chi^2 (1) = 44.9$ ;  $p < .001$ ).

We also observed a significant DISTRACTOR by AGE interaction ( $\chi^2 (2) = 8.9$ ;  $p < .05$ ). According to HSD post-hoc comparisons, the 11-13 and 18-25yo made more DisRep ( $11.1 \pm 1.8$  % and  $4.4 \pm 0.8$  %, respectively) in Dis2 than in Dis1 condition ( $5.0 \pm 1.0$  % and  $1.9 \pm 0.9$  %, respectively; both  $p < .001$ ), while this difference was not significant in 6yo children.

### *ix. Random responses.*

The rate of random responses ( $1.8 \pm 0.2$  % on average) was modulated by AGE ( $\chi^2 (2) = 24.3$ ;  $p < .001$ ; Fig. 12). HSD post-hoc analysis indicated that the 6yo ( $3.5 \pm 0.4$  %) and the 11-13yo ( $1.6 \pm 0.1$  %) made more RandRep than the 18-25yo ( $0.5 \pm 0.1$  %;  $p < .001$  and  $.05$ , respectively).

A significant main effect of CUELRN was also found significant ( $\chi^2 (2) = 6.5$ ;  $p < .05$ ). HSD post-hoc comparisons showed that participants made more RandRep in left ( $2.1 \pm 0.4$  %) than in uninformative ( $1.5 \pm 0.2$  %) cue condition ( $p < .05$ ).



**Fig. 12 | Erroneous responses before target according to age.** **a.** Cue response percentage as a function of the age [6, 11-13 or 18-25 years of age]. **b.** Random responses percentage as a function of the age. **c.** Distractor responses percentage as a function of the age. **d.** Anticipated responses percentage as a function of the age. For a, b, c and d: within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on each side.

## 4.3. EEG data

### *i. Deployment of Top-Down Attention Mechanisms*

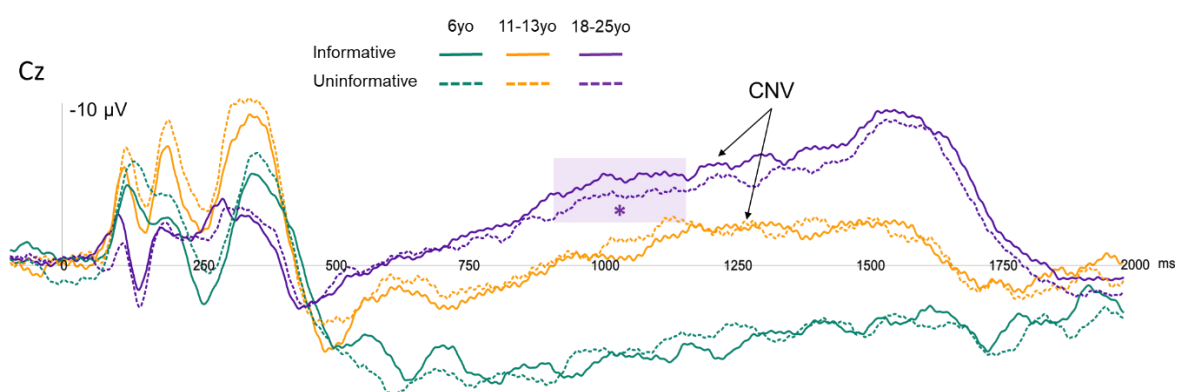
In trials with no distracting sound, analyses were focused on the deployment, during the delay, of TD processes indexed by a CNV response in adults, and on the impact of these top-down processes on target processing. In this aim, we tested the effect of the CUE information on the CNV before target onset and on the ERPs to targets. The hypothesis was that informative cues would trigger a larger deployment of TD processes, i.e. a larger CNV amplitude, and would facilitate target processing.

In adults, following the visual ERPs to the cue, a slow negative wave with central topography, the CNV, starts around 550 ms after cue onset and slowly increases until target sound onset (1350 to 1550 ms after cue onset) (Fig. 13 and 14).

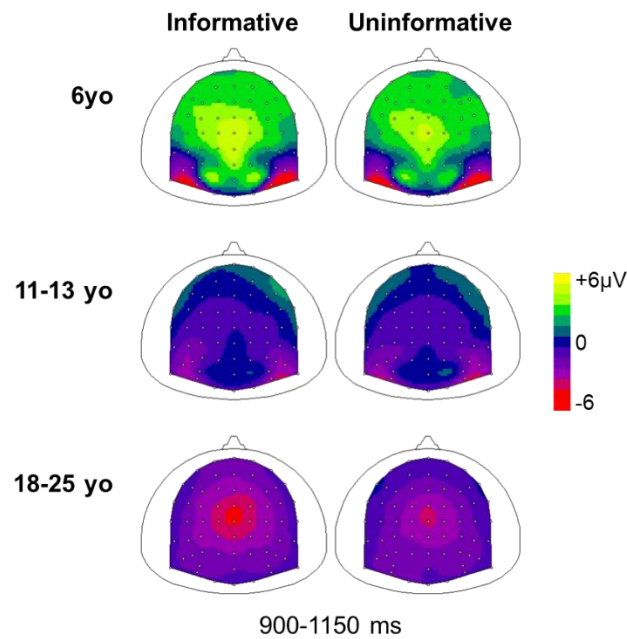
In the 11-13yo children, a slow negative wave appears much later and much smaller, around 900ms after cue onset and presents a bilateral centro-parietal topography (Fig. 13 and 14).

In children of 6 years of age, no slow negative wave can be observed, but a slow positive wave with a central topography starts around 550 ms after cue onset and slowly decreases (Fig. 13 and 14).

Statistical comparisons between informative and uninformative cue conditions, in each group separately, indicate that the CNV amplitude is larger after informative than after uninformative cues on Cz, between 900 and 1150 ms, in adults only (Fig. 13 and 14).



**Fig. 13 | ERPs to cue in NoDis trials according to age.** Mean CueRPs (pre-cue baseline correction) at the Cz electrode as a function of age and cue category (informative or uninformative). The purple rectangle indicates the time-window during which the CNV is larger after informative than after uninformative cues, in adults only.

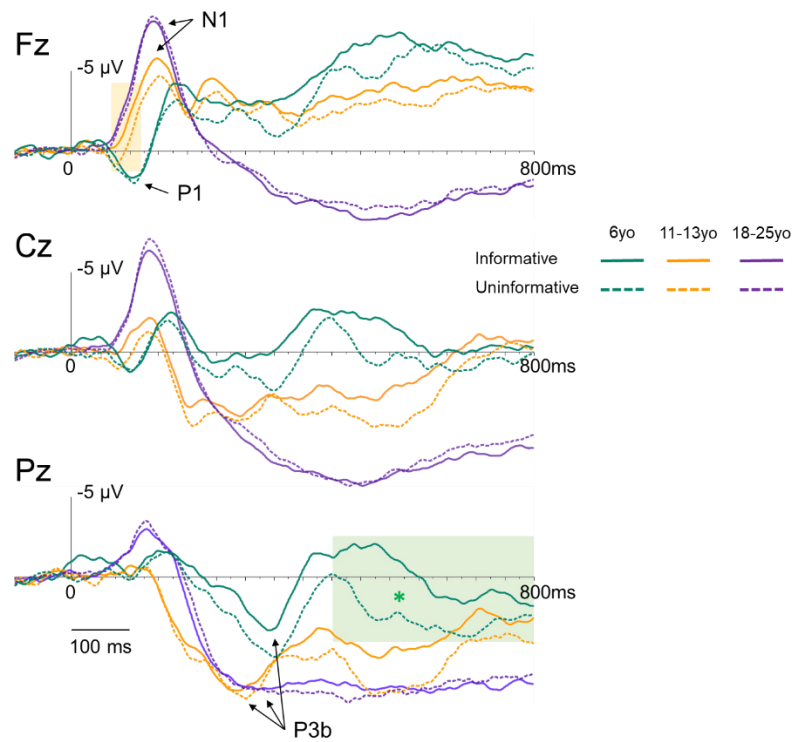


**Fig. 14 | Scalp topography of the CNV in response to cue in NoDis trials as a function of age and cue.** Scalp topographies of the CNV in trials with informative (left) or uninformative (right) cue in the 900-1150ms window after cue onset for the 6, 11-13 and 18-25yo.

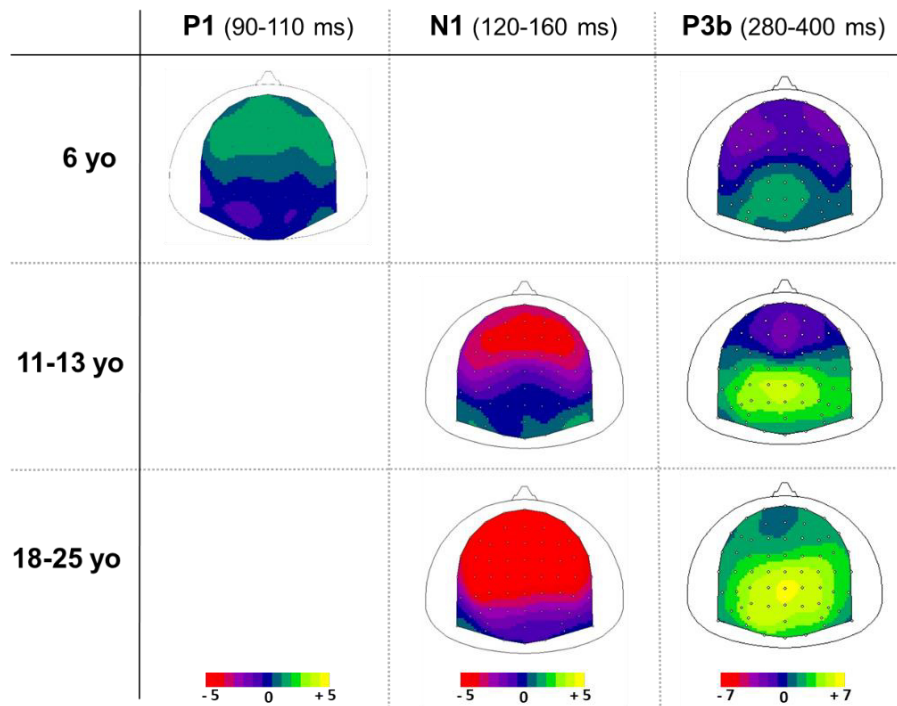
In response to target sounds, in the 11-13yo and adults, the fronto-central N1 response (~140 ms) is followed by a parietal P3b or target-P3 (200–400 ms) (Fig. 15 and 16).

In the 6yo children, a P1 response (~100 ms) is followed by a parietal P3b or target-P3 (~400 ms) (Fig. 15 and 16).

Statistical comparisons between informative and uninformative cue conditions, in each group separately, indicate that, in the 11-13yo, the N1 response, on its rising slope, is larger in trials with informative rather than with uninformative cues on Fz (Fig. 15 and 17). In the 6yo children, the P3b to targets is found larger in trials with uninformative cues rather than informative ones (Fig. 15 and 17). No significant difference is found in adults.

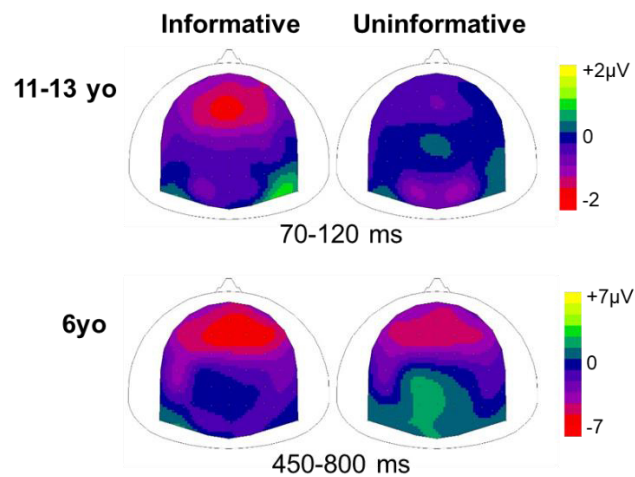


**Fig. 15 | ERPs to targets in NoDis trials according to age.** Mean TargetRPs (pre-target baseline correction) at Fz, Cz and Pz electrodes as a function of the age and cue category (informative or uninformative). The yellow and green rectangles indicate the time-windows during which the ERPs are significantly different after informative and uninformative cues, in the 6yo and 11-13yo, respectively.



**Fig. 16 | Scalp topography of the ERPs in response to targets in NoDis trials as a function of age.** Scalp topographies of the P1 (in the 6yo), N1 (in the 11-13 and 18-25yo) and P3b.





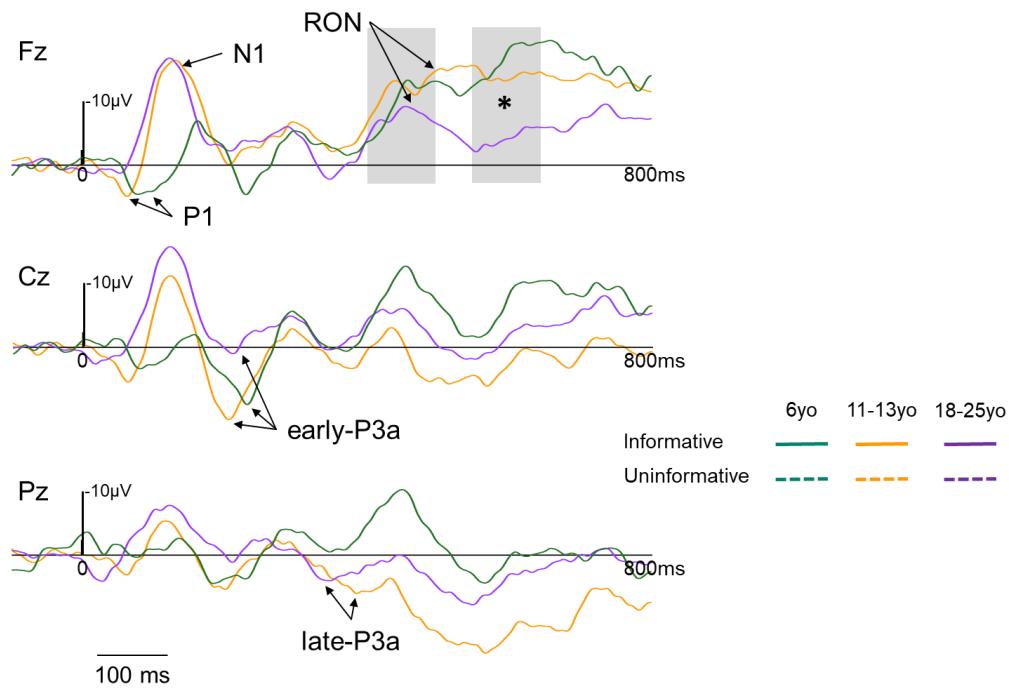
**Fig. 17 | Scalp topography of ERPs to targets in NoDis trials as a function of age and cue.** Scalp topographies of the ERPs to targets in trials with informative (left) or uninformative (right) cue at the latencies of the significant effects: 70-120 ms in the 11-13yo and 450-800 ms in the 6yo.

## *ii. Effect of age on Distracting Sound Processing*

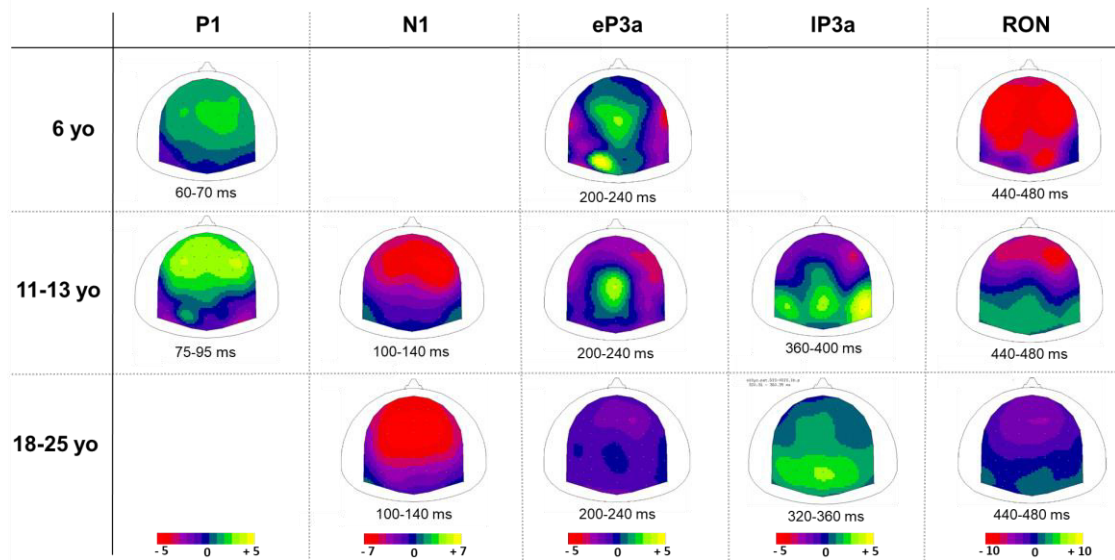
In adults and in teenagers of 11-13 years of age, in response to distracting sounds, the fronto-central N1 response (~120 ms) is followed by a P3a complex that can be dissociated in two parts: an early-P3a (200–240 ms) with a fronto-central distribution, and a late-P3a (300–340 ms) with a rather parietal distribution (Fig 18 and 19). This P3 complex is followed by a frontal negativity, named RON, and starting around 400 ms.

In the 11-13yo, the N1 is preceded by a fronto-central P1 response (75-95 ms).

In the 6yo children, a fronto-central P1 response (60-70 ms) is followed by an early-P3a (200–240 ms) with a fronto-central distribution and a frontal RON starting around 400 ms. No clear late-P3a is visible.

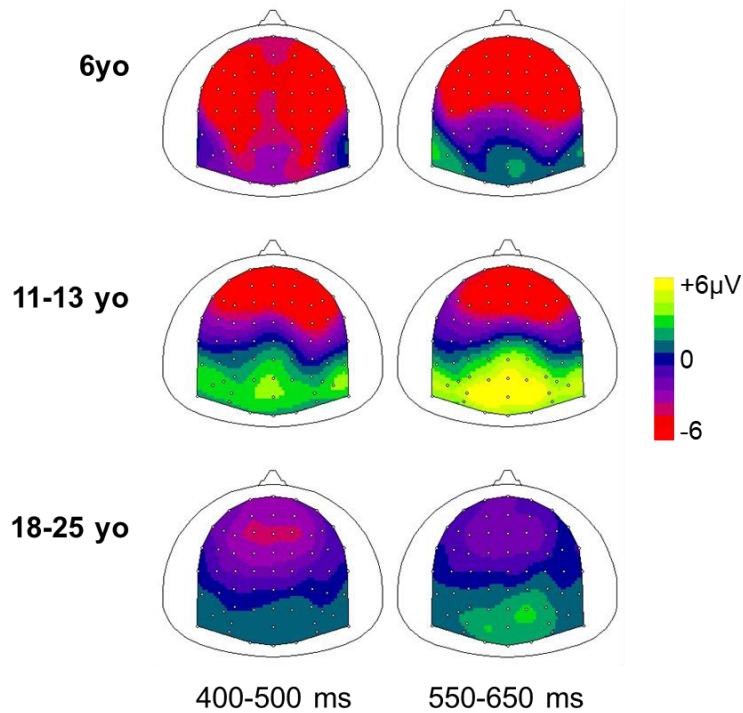


**Fig. 18 | ERPs to early distractors according to age.** Mean DisRPs (after subtraction of surrogate disRPs in the NoDIS condition at Fz, Cz and Pz electrodes) as a function of the age (6, 11-13 and 18-25yo). The grey rectangles indicate the time-windows during which the effect of age on the RON amplitude was tested. The RON was found significantly larger in the second time-window in the 6 and 11-13yo than in adults.



**Fig. 19 | Scalp topography of the ERPs in response to early distractors as a function of age.** Scalp topographies of the P1 (in the 6 and 11-13yo), N1 (in the 11-13 and 18-25yo), early-P3a (e-P3a), late-P3a (l-P3a), and RON. The used time window is indicated below each scalp topography.

We investigated the effect of AGE on an early and a late phase of the RON on Fz electrode (Fig. 20). We found a significant effect of age during the late phase only ( $p=0.040$ ): the RON is significantly larger in the 6 and 11-13yo than in adults ( $p=0.025$  &  $p=0.040$ , respectively).



**Fig. 20 | Scalp topography of the RON in response to early distractors as a function of age.** Scalp topographies of the P1 (in the 6 and 11-13yo), N1 (in the 11-13 and 18-25yo), early-P3a (e-P3a), late-P3a (l-P3a). The time window used for each computation is indicated below each scalp topography.

## 5. Discussion

*Please, note that one 6yo participant remains to be tested to complete the sample of this study. To that extent, the following conclusion is based on preliminary behavioral and EEG results.*

The distractibility state depends on TD and BU attention but also on other cognitive functions closely related to attention. Vigilance, which refers to the individual cognitive alertness, can undergo short or long modulations along the task performance, and is assumed to influence both TD and BU processes. On another hand, motor control allows to optimize the behavioral response during active tasks and has been previously found tightly linked to TD attention efficiency. Hence, the vigilance and motor control processes shall have an impact on the distractibility state and need to be taken into account when investigating distractibility, in particular during development.

### 5.1. Top-down orienting and anticipation effects

Irrespective of the age, informative cues were found to speed reaction times only in no-distractor condition. This suggests that TD attention can be affected by BU processing, whose impact would result in the suppression of the beneficial effect of informative cues on RTs.

Importantly, the cue benefit was significant in adults only, irrespective of the distractor condition. In compliance with previous results from some past studies, this indicates that TD attention continues maturing between the age of 6 and adulthood (Mezzacappa, 2004; Reis Lellis et al., 2013). However, other studies – whose one of them used another variant of the CAT in a large sample of children (study 1 of this manuscript) – have shown that the behavioral effect of TD orienting and anticipation would be mature at age 6. This discrepancy can be explained by the difference in cue type proportions 50% uninformative and 50% informative in the present study and 25% uninformative and 75% informative in the previous study using the CAT: thus, difference in TD effect on RT between the present and last CAT studies in children might come from an immature ability to efficiently use cues when the predictability is quite low. It is also possible to hypothesize that this difference might also be related to the task duration (i.e., TD effect fading along the whole task in children) or to the sample's characteristics. External variables such as socio-economic status have indeed been found to influence the developmental trajectory of attention and distractibility.

Both the 6yo children and adults made less late responses in informative than uninformative cue condition, but this effect was higher in adults. Decreasing the target occurrence uncertainty would then allow TD attention processes to shield from attentional lapses; the efficiency of this ability would grow during childhood.

At the brain level, the use of cue information was only found in adults with an enhanced CNV after informative cue. This CNV response is considered to reflect both attentional and motor preparation for the imperative (target) stimulus (review in Brunia and van Boxtel, 2001). The enhanced CNV in adults is more likely to be related to attentional processes than motor preparation since the motor response could be evenly anticipated in all cue conditions. In line with no cue effect on reaction times in 6 and 11-13yo, the absence of cue effect before target onset in children suggests immature anticipatory attention at least until early adolescence.

However, the 6yo and 11-13yo show cue effect on target processing. On one hand, young adolescents present a larger N1 response (around 70 to 120 ms) to the target sounds, at frontal sites, when preceded by an informative cue rather than an uninformative one. This result could reflect the enhancement by attention of expected target processing, as observed when comparing ERPs to attended and unattended stimulus (Bidet-Caulet et al., 2007; Hillyard et al., 1973). On the other hand, the 6yo children present a smaller P3b response (from 450 to 800 ms) to targets after informative rather than uninformative cues, at posterior sites. This reduction in target-P3 amplitude is quite likely to be related to the decrease in target uncertainty and surprise (Duncan-Johnson & Donchin, 1977; Mars et al., 2008; Suwazono et al., 2000) in informative trials compared to uninformative ones. This result is in line with fewer late responses in informative trials at 6 years of age.

Interestingly, the older the participants get, the earlier the effect of cue information is observed. In 6yo children, the very late latency and nature of the effect suggests a reactive stimulus-driven strategy to process targets, in particular the less predictable ones, with no anticipation at all. At 11-13 years of age, teenagers would not be able to proactively modulate anticipatory processes, but could reactively use top-down attention to enhance expected target processing at very early latencies. Finally, adults can proactively modulate top-down attention processes in anticipation of the target. A shift from a reactive to a proactive strategy from childhood to adulthood in attention, is in line with a gradual shift, with development, from a reactive posterior stimulus-driven strategy to a proactive anterior TD strategy in cognitive control (Andrews-Hanna et al., 2011b; Chevalier et al., 2014; Lucenet & Blaye, 2014; Munakata et al., 2012; Padilla et al., 2014; Smith et al., 2011).

Altogether, the aforementioned results thus indicate a progressive maturation of TD attentional orienting and anticipation along childhood, with a shift from a reactive to a proactive strategy.

## 5.2. Sustained attention

Irrespective of the age, participants showed increased missed and late responses rates in no distractor trials, suggesting that distracting events can improve the performance stability throughout the task in both children and adults. This improvement might be driven by the arousal increase ensuing from distractors occurrence all along the task.

(i) RT variability was, overall, found enhanced in the 6yo children compared to their older peers and adults. (ii) The 6yo children manifested a heightened fatigability after having performed a quarter of the task (~12min), while the 11-13yo and adults showed a similar RT variability during the whole experiment. Additionally, (iii) the 6yo children missed more target than the 11-13 and adults. Taken together, these findings indicate that, between 6 and 11 years of age, sustained attention development during childhood is characterized by a growing ability to maintain attention over short (iii) and long (i) periods of time, as well as an increase in cognitive resources available to perform the task, or an improvement in their allocation control (ii).

## 5.3. Facilitation and distraction effect due to distractor occurrence.

Similar to previous results from studies using the CAT, distracting sounds induced both a gain and a cost on reaction times. The RT gain is assumed to result from an arousal increase, while the cost would result from BU attentional capture and subsequent TD attention invoked to focus back at the task at hand.

Results from this study indicate that both the (i) arousal facilitation and (ii) deleterious distraction effects decreased from 6yo to adult age. This is (i) in line with previous findings from a CAT-based study suggesting an immature phasic arousal effect in 6 to 8yo children, but (ii) contradictory regarding the distraction effect which has been reported experiencing no age modulation from 6yo to adulthood (Study 1, Hoyer et al., 2019). In the present study, the significant enhanced RT distraction effect in the 6yo children could be linked to the task design, which is assumed to be more cognitive demanding than the one previously used (~1h of task instead of 15min). The first developmental CAT study has also reported

that 6 and 7yo children had higher rate of missed responses in distractor compared to no-distractor trials, while the present study did not report this evidence. This last divergence in results is likely to be due to either differences (i) in proportion of distractor trials in the tasks, (ii) in children's motivation to performed the task (reward vs. no reward) or (iii) in socio-economic differences between sample of children.

Furthermore, the 6yo children made more late responses than the 11-13yo and adults in the early distractor condition, and more late responses than adults in the late-distractor condition. This suggests that the distraction effect would either last longer or have a heavier impact on target processing in children from 6 to 13yo than in adults.

At the level of the brain, we found that the RON in response to distracting sounds lasts longer in the 6 and 11-13yo than in adults, indicating prolonged processing of distracting sounds. The RON has been proposed to index the reorientation back towards the task at hand (Escera et al., 2003; Escera & Corral, 2007; Horváth et al., 2009; Horváth, Winkler, et al., 2008; Wetzel & Schröger, 2014). This prolonged response in children would then reflect difficulties in switching from distractor processing back to target anticipation, in line with increased distraction effect in 6 and 11-13yo at the behavioral level. Therefore, enhanced behavioral distraction in children would, at least partially (since we did not yet investigate earlier distractor processing steps) result from immature TD reorientation processes.

#### **5.4. Impulsivity and motor control**

Furthermore, the children of 6 years of age made more cue responses than adults, and the 6 and 11-13yo also showed higher random responses rates compared to adults. In accordance with previous results from a study using the CAT in children (Hoyer et al., 2019), these results show that impulsive responses to non-target stimuli decreases between 6yo and adulthood, while motor control increases between 11yo and adulthood. The 11-13yo children and adults also exhibited higher rates of distractor responses in late- than early-distractor condition, indicating that the more the distractor occurs close to the target, the more it had a chance to trigger a motor response, probably because of enhanced motor and attention preparation the closer you get to the target. The children of 6 years of age did not presented a similar distractor timing effect, in line with the absence of anticipatory processes at this age (no clear CNV response). Finally, in the 11-13yo children, the rate of anticipated response was enhanced compared to their younger peers

and adults. This is in line with results from a previous CAT study in children showing increase impulsivity in expectancy of a target during late childhood and adolescence (Hoyer et al., 2019). Altogether, these findings suggest that impulsivity and motor control respectively decrease and increase from childhood to adulthood.

## 5.5. Conclusion

Preliminary behavioral and EEG results from this study indicate that TD orienting, anticipatory and sustained attention processes are still maturing in children from 6 to 13 years of age. The EEG findings suggest that the maturation of attentional anticipation and preparation is supported by a shift from a reactive to a proactive strategy. Distraction and arousal effect linked to the distractor occurrence in the CAT decrease from 6yo to adulthood. Increased behavioral distraction in children would, at least partially, result from immature top-down reorientation processes. Furthermore, the development of distractibility is associated with an increase in motor control between 6 and 11yo and a decrease in impulsivity between age 14 and adulthood, probably in line with the reactive to proactive shift in cognitive control.

Taken together, these results suggest that distractibility in children is supported by immature TD and BU attention processes. Further analysis of the EEG data will help to better understand which brain maturation processes underlie the behavioral development of distractibility during childhood.



## 6. Supplementary information

### A. Detailed measurements parameters

Fig. S1 | Behavioral measurements, parameters for calculations and measured construct.

| Behavioral measurements of attention effects on target processing |                                      |  |  |
|---|--------------------------------------|--|--|
| Measure Abbreviation  | Measure Name                         | Measure Description  | Measured Construct   |
| RT  | Reaction times                       | RT of positive response times  | Overall processing speed   |
| Arousal effect  | ""                                   | Median RT: NoDis – Dis1  | Facilitation effect:<br>Index of arousal due to presence of early distractor |
| Distraction effect  | ""                                   | Median RT: Dis2 – Dis1   | Distraction effect:<br>Index of competition between distractor and target    |
| RT SD   | Standard deviation of reaction times | Mean standard deviation of positive response times in all operating distractor conditions for group or 4 blocks separately   | Variability in processing speed<br>Failure of long term sustained attention  |
| LateRep   | Late response                        | Percentage of responses in the NoDis condition during the period starting from the RT upper-limit to 3300 ms   | Slow processing error<br>Failure of short term sustained attention           |
| MissRep   | Missed response                      | Percentage of trials without any response made during the entire trial duration up to 3300 ms post-target  | Error of omission<br>Lapse of sustained attention                            |
| Behavioral measurements of attention effects on target expectancy |                                      |  |  |
| Measure Abbreviation  | Measure Name                         | Measure Description  | Measured Construct   |
| CueRep  | Cue response                         | Percentage of [incorrect or false-alarm] responses performed during the 150-450ms period post-cue onset  | False alarms in response to the cue<br>Impulsivity                           |
| DisRep  | Distractor response                  | Percentage of responses performed during the 150-450 ms period post-distractor onset   | False alarms in response to the distractor<br>Impulsivity                    |
| AntRep  | Anticipated response                 | Percentage of responses performed:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>➔ <i>in NoDis and earliest Dis1</i>: from 300 ms pre-target to the RT lower limit post-target;</li> <li>➔ <i>in latest Dis1</i>: from 250 ms pre-target to the RT lower limit post-target;</li> <li>➔ <i>in earliest and latest Dis2</i>: from 200 ms pre-target to 100 ms pos-target, respectively, to the RT lower limit post-target.</li> </ul>  | False alarms in anticipation of the target<br>Impulsivity                    |
| RandRep   | Random responses                     | Percentage of responses performed in the remaining periods of the trials:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>➔ <i>in NoDis</i>: during the 450 to 1000 (min) - 1200 (max) ms period post-cue onset;</li> <li>➔ <i>in earliest Dis1</i>: during the 450 to 500 (min) - 700 (max) ms period post-cue onset, and the 300 to 400 (min) - 600 (max) ms period post-cue distractor onset;</li> <li>➔ <i>in latest Dis1</i>: during the 450 to 800 (min) - 100 (max) ms period post-cue onset;</li> <li>➔ <i>in earliest Dis2</i>: during the 450 to 850 (min) - 1050 (max) ms period post-cue onset;</li> <li>➔ <i>in latest Dis2</i>: during the 450 to 1050 (min) - 1350 (max) ms period post-cue onset.</li> </ul> | Erroneous responses outside of response parameters above                     |

## B. Auditory threshold analysis

The Bayesian repeated measures ANOVA showed a positive evidence for a non-uniform distribution of auditory threshold across age ranges ( $BF_{10} = 5.3$ ): in both the right and left ear, the 6 years of age participants had higher auditory perception thresholds than the 11-13yo and adults (see below for more details).

### Main analysis.

| Models                              | P(M)  | P(M data) | $BF_M$ | $BF_{10}$ | error % |
|-------------------------------------|-------|-----------|--------|-----------|---------|
| Null model (incl. subject)          | 0.200 | 0.120     | 0.543  | 1.000     |         |
| Age                                 | 0.200 | 0.631     | 6.854  | 5.280     | 1.020   |
| EarType + Age                       | 0.200 | 0.180     | 0.875  | 1.501     | 2.528   |
| EarType + Age + EarType * Age(type) | 0.200 | 0.036     | 0.151  | 0.304     | 1.818   |
| EarType                             | 0.200 | 0.033     | 0.137  | 0.276     | 0.941   |

---

*Note.* All models include subject

### Post-hoc Tests for Age effect

#### Post Hoc Comparisons - Age

|    |    | Prior Odds | Posterior Odds | $BF_{10, U}$ | error %   |
|----|----|------------|----------------|--------------|-----------|
| 6  | 11 | 0.587      | 19.684         | 33.510       | 5.123e -6 |
|    | 18 | 0.587      | 9.698          | 16.510       | 5.058e -5 |
| 11 | 18 | 0.587      | 0.156          | 0.265        | 0.003     |

---

*Note.* The posterior odds have been corrected for multiple testing by fixing to 0.5 the prior probability that the null hypothesis holds across all comparisons (Westfall, Johnson, & Utts, 1997). Individual comparisons are based on the default t-test with a Cauchy (0,  $r = 1/\sqrt{2}$ ) prior. The "U" in the Bayes factor denotes that it is uncorrected.

### **C. Detailed parameter for statistical analysis of RT SD and erroneous response**

RT SD were log-transformed at the single trial scale to be better fitted to a linear model with Gaussian family distribution, with the fixed factors AGE as between-subject factor and BLOCK (4 levels) as within subject factor.

Response types were re fitted to a linear model with binomial distribution without transformation. GLMMs extend the linear mixed model to deal with non-normally distributed data. In particular, GLMMs can handle binary data and consider a number of data points equal to the total number of trials presented during the test at the subject scale. Because of the general scarcity of response type measurements when compared with correct responses their modelization was limited to two-way interactions.

LateRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE as between-subject factor and CUE (2 levels) as within subject factor. Only, the NoDis condition was analyzed since few participants committed LateRep in distractor conditions (total average:  $3.5 \pm 0.1\%$ ).

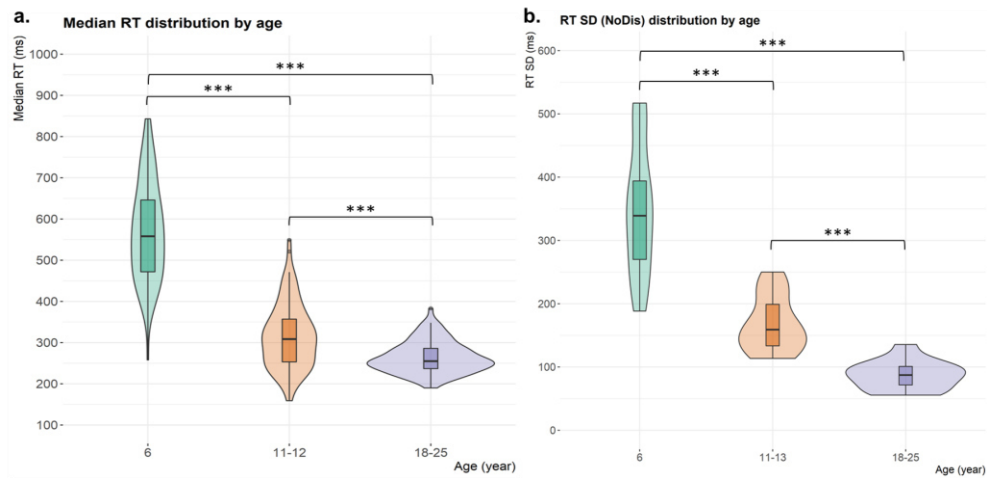
MissRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE as between-subject factor and CUE (2 levels) and DISTRACTOR (4 levels) as within subject factor.

CueRep and Randrep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE as between-subject factor and CUELRN (3 levels) as within subject factor. As all participants made in average less than 1 % of CueRep and RandRep, responses were considered across all DISTRACTOR levels (NoDis, Dis1, Dis2, Dis3).

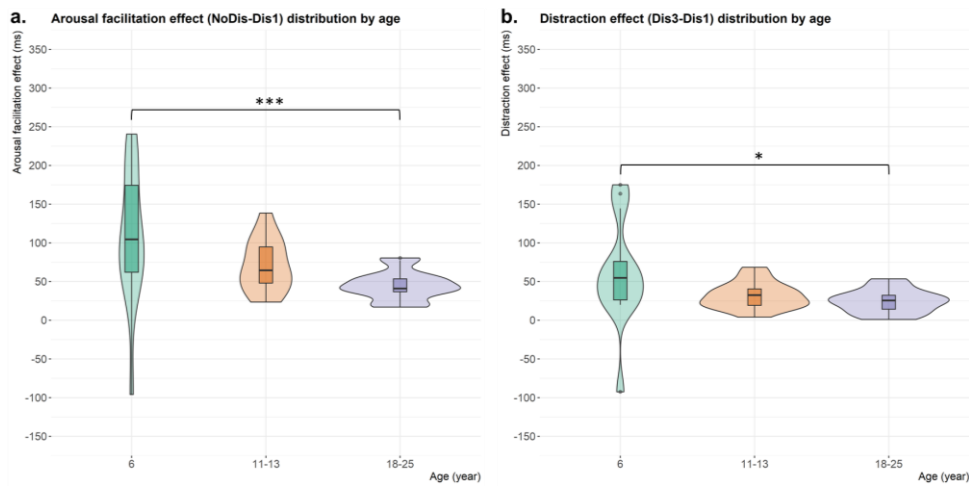
DisRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE as between-subject factor and CUELRN (3 levels) as within subject factor. Responses were considered across DISTRACTOR levels (Dis1, Dis2, Dis3).

AntRep were fitted to a linear model with binomial distribution without transformation, with fixed factors AGE as between-subject factor and CUELRN (3 levels) as within subject factor. Because of the important differences in the duration of the AntRep windows between distractor conditions (see Fig. S3), the GLMM was performed on the NoDis and Dis1 conditions, only (same time-frame for AntRep in these two conditions).

## D. Distributions of reaction times

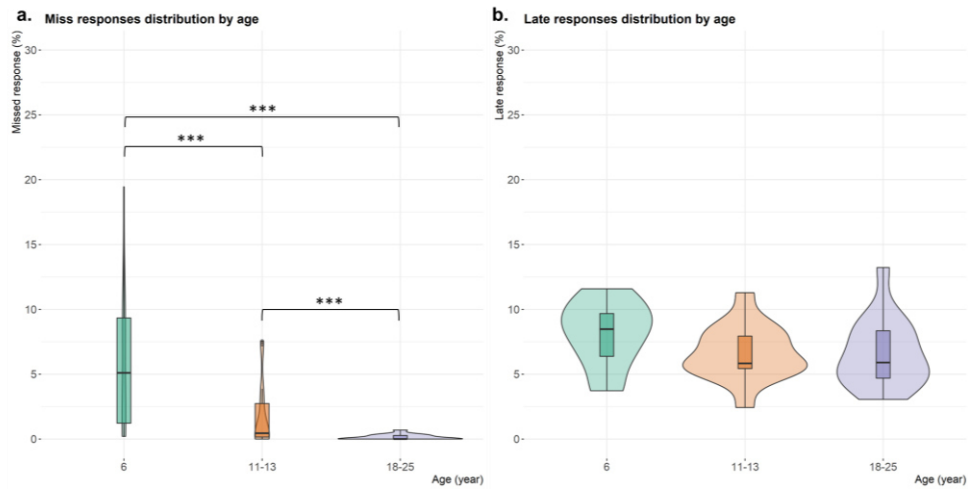


**Fig. S2 | RT and SD RT according to age.** **a.** Median reaction time distribution by age [6, 11-13 or 18-25 years of age]. **b.** Reaction time variability (RT standard deviation across blocks) by age. ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*). Within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on left and right side.



**Fig. S3 | RT arousal and distraction effects according to age.** **a.** Reaction time differences between NoDis and Dis1 (arousal effect) as a function of the age. **b.** Reaction time differences between Dis3 and Dis1 (distraction effect) as a function of the age range. ( $p < .05$  \*,  $p < .01$  \*\*,  $p < .001$  \*\*\*). Within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on left and right side.

## E. Distribution of responses after target



**Fig. S4 | Responses after target according to age.** a, Missed responses percentage as function of the age [6, 11-13 or 18-25 years of age]. b, Late responses percentage as a function of the age. For a and b: within each boxplot (Tukey method), the horizontal line represents the median, the box delineates the area between the first and third quartiles (interquartile range); juxtapose to each boxplot, the violin plot adds rotated kernel density plot on each side.

Section IV :

# Approche méthodologique pour la validation du Competitive Attention Test

## 1. Foreword

Only few neuropsychological tests enable to measure distractibility in clinical settings. The CAT, which measures different attentional facets contributing to distractibility, has firstly been developed for basic research purposes. This simple paradigm can be performed starting from 4 years of age (see Study 2), and is also perfectly suited for adults testing. Previous studies using the CAT have highlighted its relevance for characterizing behavioral and brain differences in distractibility along the lifespan (Bidet-Caulet et al., 2015; Elshafei et al., 2020; ElShafei, Bouet, et al., 2018; ElShafei et al., 2019; Hoyer et al., 2019; Masson & Bidet-Caulet, 2019). To that extent, it is possible to hypothesize that the CAT paradigm could be a useful tool to detect dysfunctions of the attentional components that it measures.

Increased distractibility in the everyday life is one of the most frequent complaints of patient with attention deficit disorder with or without hyperactivity (ADHD). The earlier ADHD is detected in childhood, the less important are its deleterious effects on the child development and school learning. Several attention facets measured by the CAT such as voluntary and involuntary orienting, sustained attention or impulsivity have previously been found impaired in ADHD children. Because the CAT targets attention facets assumed to be dysfunctional in ADHD, and because it can be performed relatively quickly (~20 min) by a large age range of individuals (4-90-years-old [yo]), this research test could turn out to be a relevant tool to detect ADHD in clinical practice.

However, transferring a test from the research to the clinical field implicates several requirements. First, evidence showing that measurements from the test are reliable need to be claimed: this refers to the content validity of the test. Second, the test must be sensitive and specific, it must be efficient to dissociate normal and pathological scores: this refers to the criterion validity of the test. Third, the test must assess the cognitive function that is supposed to be assessed: this refers to the construct validity of the test.

In this section, I present the validation procedure I implemented to assess the content, criterion and construct validity of the CAT.

## 2. Content validity

The ability of a psychometric test to provide reliable measurements in a wide range of individuals refers to its content validity. Several methods such as test-retest, parallel forms of reliability or inter-rater reliability allow to estimate the content validity of a given test. In order to explore the CAT content validity, we set-up a test-retest procedure using the CAT in a healthy population of children and adults (6 to 90yo).

### 2.1. Procedure

To limit learning effects during the test-retest procedure, we developed a parallel version of the CAT. Hence, the first CAT version (CAT A) uses dogs as visual cues and feedback, while the second version (CAT B) uses cats (Fig. 46); the dog barking target sound used in the CAT A was replaced by a cat meowing in the CAT B. The timing within and between trial events is strictly similar in CAT A and B (see p. 114 for details).



**Figure 46** : Visual stimuli used as cues and feedback in the parallel version of the CAT (CAT B). The informative cue (left part) is pointing either to left or right and indicates the spatial position of the forthcoming auditory target (cat meowing). The uninformative cue (middle part) is sitting front and do not provide any spatial indication regarding the forthcoming auditory target. The feedback (right part), a happy cat playing with yarn, is displayed only when the child responds during the 3300ms post-target period.

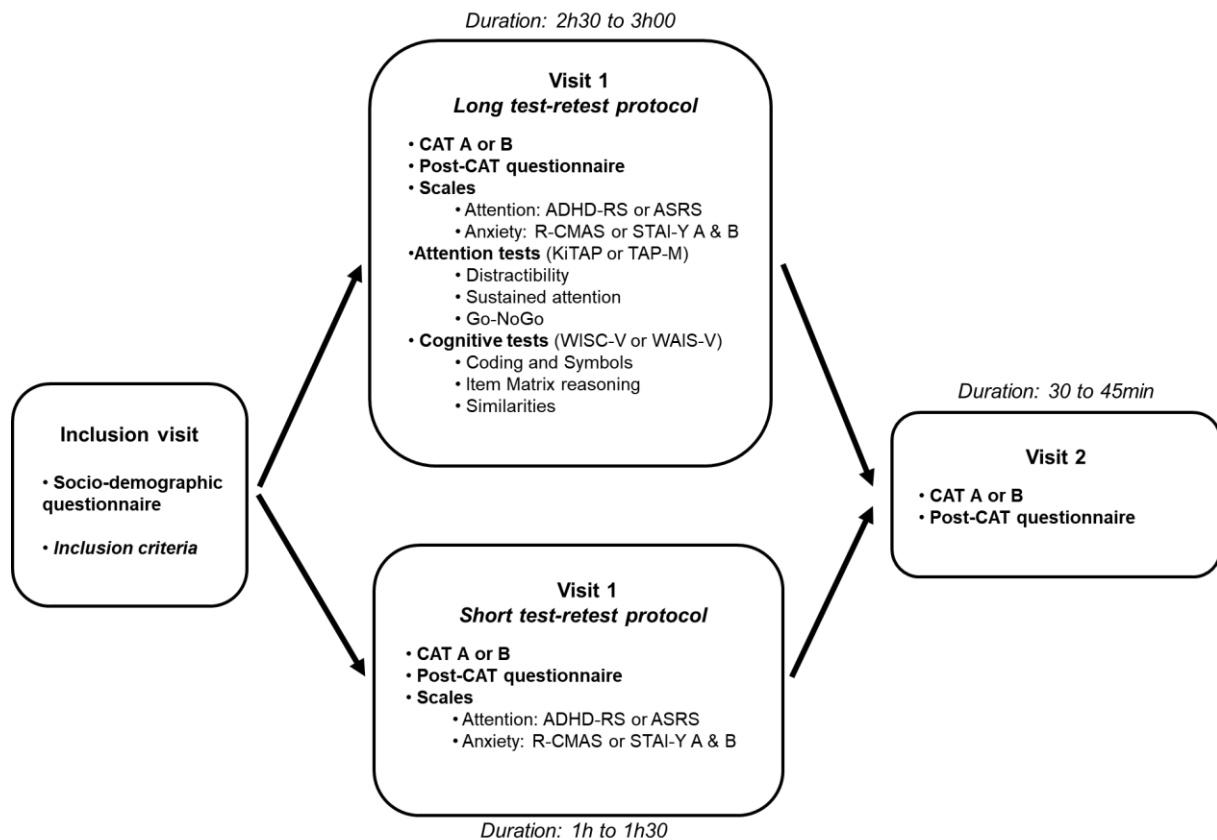
For assessing the CAT content validity, we set the number of participants to 84 healthy children and adults (6 to 90yo), divided in 13 age groups (see Tab. 8 for more details). Inclusion criteria are: no neurological or psychiatric disorder, no auditory problem, and no medication affecting the central nervous system.



**Tableau 8** : Planned samples, according to age, of participants the test-retest procedure.

| <b>Required number of participants<br/>(minimum)</b> |  |   |                                |
|--|--|---|--------------------------------|
| <b>Age ranges</b>                                    | <b>Participants short<br/>test-retest<br/>protocol</b> | <b>Participants long<br/>test-retest<br/>protocol</b> | <b>Participants<br/>needed</b> |
| 6-7yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 8-9yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 10-11yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 12-13yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 14-15yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 16-17yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 18-20yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 21-30yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 31-40yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 41-50yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 51-60yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 60/69yo  | 3  | 3   | 6                              |
| 71-90yo  | 6  | 6   | 12                             |
| <b>total</b>   | 42   | 42  | 84                             |

This content validity study includes two visits at the laboratory, separated from 2 to 6 weeks. Participants either perform a short or a long version of the research protocol (see Fig. 47). Participants enrolled in the short version of the protocol perform the CAT only. The obtained data will allow assessing intra-rater reliability and internal consistency reliability. Participants enrolled in the long version of the protocol perform both the CAT and additional neuropsychological tests whose scores can be used to estimate the concurrent. Different experimenters are involved in testing both children and adults during short and long version of the protocol, allowing assessment of the inter-rater reliability.



**Figure 47** : Schematic representation of the procedure used to assess content validity of the CAT. All participants first undergo an inclusion visit. During the first experimental visit, participants are enrolled either in the short or long test-retest protocol; whatever the duration of the protocol, participants perform the CAT a first time during this visit (test session). Finally, all participants complete a second visit separated from the first one by approximately one month; participants perform the CAT a second time during this visit (re-test session).

### **First visit**

#### Short test-retest protocol: 'test' session

Participants first perform the CAT A or B in a quiet room, and then fill out a short post-experiment questionnaire, as well as attention and anxiety questionnaires. The Adult Self-Report Scale (ASRS; Kessler et al., 2005) and the Attention-Deficit Hyperactivity Disorder Rating Scale IV (ADHD RS; DuPaul et al., 1998) questionnaires, are both used to assess symptoms of ADHD in adults and children, respectively, according to the diagnostic criteria of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, 2013). The Revised Children's Manifest Anxiety Scale (RCMAS; Cowart, 1987) and State-Trait Anxiety Inventory (STAI) Y-A and -B (Spielberger et al., 1970) are used to evaluate anxiety in children (general anxiety) and adult (anxiety state and trait), respectively. The R-CMAS (anxiety scale) is administered to the child by the experimenter and the ADHD-RS (attention scale) is filled out by parents. Adult participants complete the STAI-Y-A and -B (anxiety scale) and the ASRS.

The short protocol first visit lasts from 1 h to 1 h 30 according to age (longer duration in children than adults).

Long test-retest protocol: 'test' session.

In the long version of the protocol, the same procedure than described above is used, except that additional neuropsychological tests are administered to the participants (Fig. 47).

Following the CAT performance, the Distractibility, Sustained attention and Go-NoGo subtests of the KiTAP and TAP-M batteries are respectively used in children and adults to assess attention and impulsivity. The KiTAP (normed data available: 6-7 and 8-9yo) and TAP-M (normed data available: 18-89yo) batteries are often used in clinical settings to detect the behavioral manifestation of ADHD.

Then, the Similarities, Matrix reasoning, Coding and Symbols subtasks from the WISC-IV (normed data available: 6-16yo) and WAIS-IV (normed data available: 17-80yo) are performed by children and adults, respectively. The Similarities score is used to assess the ability to understand, learn and retain verbal information; the Matrix reasoning score is used as an index of individual ability to understand visual information and to solve visual problems; finally, the Coding and Symbols scores are used as a measurement of cognitive speed.

Finally, the ADHD-RS, ASRS, R-CMAS and STAI-Y A and B questionnaires are administered following the procedure described for the short test-retest protocol.

The short protocol first visit lasts from 2 h 30 to 3 h according to age (longer duration in children than adults).

**Second visit**

Short and long test-retest protocol – 'retest' session.

The second visit is similar for both the short and long test-retest procedure. Participants first perform the CAT A or B in a quiet room, and fill out the short post-experiment questionnaire (Fig. 47). All participants perform the CAT A and B during the study. If the CAT A is performed during the first visit, the CAT B is administered during the second visit, and vice-versa. The order of administration of the CAT versions is equiprobably distributed between short and long test-retest protocols and age ranges.

The second visit lasts from 30 to 45 min according to age (longer duration in children than adults).

## 2.2. Planned analysis

### ***Intra-rater reliability***

We plan to perform repeated measures Bayesian ANOVA on the CAT measurements obtained during the first and second experimental sessions (First vs. Second visit). To validate the reliability of the CAT measurement, results must indicate no difference in the measurements provided by the test and retest evaluations across age ranges. We also plan to perform correlation analysis at the subject scale to compare individual performances across experimental sessions: we hypothesize a positive correlation between scores from the first and second visit. Bayesian analysis offers a logical way to accommodate prior knowledge. The specification of priors for such analysis will allow to control for possible learning effects linked to the test-retest design.

### ***Concurrent reliability***

The content validity of the CAT can also be assessed using the concurrent and internal reliability method. We plan to perform correlation analysis between measurements provided by the CAT and measurements from the KiTAP or TAP, and the WISC or WAIS. We expect to observe correlations between the CAT and the KiTAP or TAP measurements: these tests are indeed assumed to evaluate similar specific constructs (e.g. distractibility and sustained attention). We also predict correlations between the CAT measurements and the Coding and Symbols tasks, which tap into selective attention (Mayes & Calhoun, 2006). Because the Similarities and Matrix reasoning scores are believed to index domain general cognitive efficiency, we hypothesize that no correlation will be observed between those scores and the specific attentional measurements provided by the CAT. The presence or absence of such expected correlation patterns would confirm that the CAT is relevant to evaluate constructs specifically linked to attention (Tab. 9 for additional details).

**Tableau 9** : Summary of the planned comparisons between the CAT and other neuropsychological measurements acquired as part of the Study 5. Measures will be compared according to the construct that they pretend to evaluate. Each measurement provided by the CAT and other neuropsychological tests either assesses a specific or general cognitive ability. Specific patterns of correlation between measurements provided by the CAT and other neuropsychological tests are expected to prove the CAT content validity.

| Comparison between tests                            | Comparable measured construct | Domain related (specific of general) | Reliability type                               | Patterns of correlation expected |
|---|-------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|
| CAT A vs. CAT B                                     | Auditory distractibility      | Specific                             | Intra-rater reliability                        | Correlation                      |
| CAT(A - B) vs. Distractibility (KITAP / TAP-M)      | Auditory distractibility      | Specific                             | Concurrent reliability (convergent validity)   | Correlation                      |
| CAT(A - B) vs. Sustained attention (KITAP / TAP-M)  | Sustained attention           | Specific                             | Concurrent reliability (convergent validity)   | Correlation                      |
| CAT(A - B) vs. Go/NoGo (KITAP / TAP-M)              | Impulsivity                   | Specific                             | Concurrent reliability (convergent validity)   | Correlation                      |
| CAT(A - B) vs. Coding (WISC-IV / WAIS-IV)           | Processing speed              | General                              | Concurrent reliability (discriminant validity) | Correlation                      |
| CAT(A - B) vs. Symbols (WISC-IV / WAIS-IV)          | Processing speed              | General                              | Concurrent reliability (discriminant validity) | Correlation                      |
| CAT(A - B) vs. Matrix reasoning (WISC-IV – WAIS-IV) | Perceptual Reasoning Index    | General                              | Concurrent reliability (discriminant validity) | No correlation                   |
| CAT(A - B) vs. Similarities (WISC-IV – WAIS-IV)     | Verbal Comprehension Index    | General                              | Concurrent reliability (discriminant validity) | No correlation                   |

### ***Inter-rater reliability***

Furthermore, the content validity of the CAT can be evaluated using the inter-rater reliability method. If measurements from the CAT are reliable, they should not – within a same age range – be varying according to the experimenter. We therefore plan to perform repeated measures Bayesian ANOVA on several CAT measurements with between subject factors Experimenter and Age. If the CAT measurements are reliable, we should observe no difference between measurements according to experimenter, but we should observe differences linked to age.

### ***Internal consistency***

In order to investigate the internal consistency of the CAT measurements we plan to perform correlation analysis between the different measurements of the test. We expect to observe no correlation between the CAT measurements assessing different constructs (e.g. for RT, the distraction effect should not correlate with the voluntary orienting effect), but we expect a positive correlation between the measurements assessing similar constructs (e.g. the late and missed responses rate in distractor condition should correlate as they are both believed to index distraction).

### 3. Criterion validity

A pathological increase in distractibility can be related to neurodevelopmental disorders such as ADHD, to acquired neurological problems (e.g. traumatic brain injury) or even to neurodegenerative disease (e.g. Parkinson disease). To that extent, the CAT could be an interesting tool to assess distractibility in a wide range of clinical populations.

The ability of a neuropsychological tool to dissociate normal and pathological patterns of behavioral performances (sensitivity and specificity) refers to predictive validity. To prove that the CAT can detect pathological distractibility, scores (in percentile) derived from the CAT measurements need to be compared to the clinical diagnosis outcomes. The CAT scores should indeed be pathological if the diagnosis outcomes suggest that the patient suffers of ADHD. By contrast, the CAT scores should be normal in participants who do not present any neurological dysfunction. Moreover, to prove the clinical concurrent validity of the CAT, the scores that it provides should be coherent with those from other standardized neuropsychological test assessing similar constructs. Finally, to prove the predictive validity and the concurrent validity of the CAT measurements, patient's performances must be compared to normative values: a normative data base for the CAT then needs to be built.

In order to explore the CAT criterion validity (predictive validity and clinical concurrent validity), we implemented a procedure to test children with ADHD using the CAT.

#### 3.1. Procedure

Participants are included in the research protocol following an inclusion visit (Fig. 48). Inclusion criteria are: no hearing impairment, no psychiatric disorder and no psychostimulant treatment at the time of the experiment.

We are aiming at testing 60 patients (6 to 15yo) in this research protocol. The sample is divided in three groups based on their ADHD clinical form: 20 children with a predominant inattentive ADHD form, 20 children with a predominant hyperactive/impulsive ADHD form and 20 children with a mixt ADHD form. Data from study 1 will be used as data from healthy participants (Study 1). All participant groups will be matched for age, gender, and handedness.

The CAT paradigm which will be used in this procedure will be strictly identical to the paradigm described in Study 1 (p. 114 for details).

The research testing will be performed during the neuropsychological examination as part of the clinical routine. Patients will perform the CAT A (3 blocks of 48 trials) while being not under psychostimulant treatment, and will fill out the short post-experiment questionnaire (Fig. 48). Parents of patients will complete:

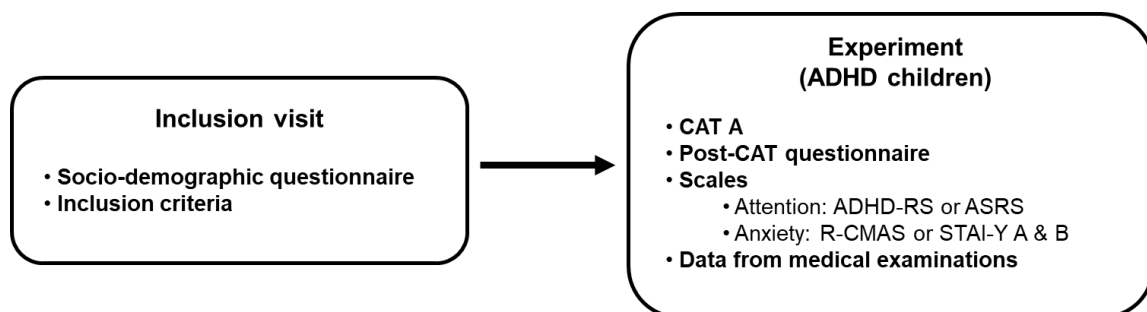
- the Attention-Deficit Hyperactivity Disorder Rating Scale IV (ADHD RS; (DuPaul et al., 1998) assessing symptoms of ADHD in children according to the diagnostic criteria of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (American Psychiatric Association, 2013),
- the Sleep Disturbance Scale for Children (SDSC; Putois et al., 2017) and Epworth questionnaires to evaluate the quality of sleep and somnolence tendency in children (Janssen et al., 2017).

The Revised Children's Manifest Anxiety Scale (RCMAS; Cowart, 1987), used to assess anxiety in children, will be administered to patients by investigators.

Relevant clinical data will be collected from patients' medical files accessible at the hospital:

- The WISC and WAIS scores indexing verbal comprehension, perceptual reasoning, working memory and processing speed will be collected from most recent neuropsychological and psychiatric examinations.
- The data related to external factors which may have influenced the child development (e.g. complications of stress during pregnancy or previous medical treatment).

The experiment will last approximately 45 min.



**Figure 48** : Schematic representation of the research procedure used in patients with ADHD. All participants first undergo an inclusion visit. During the experimental session, patients with ADHD will perform the CAT A without having taken any psychostimulant medication.

## 3.2. Planned analysis

### Group analysis

In order to better understand how attention functioning can be impacted by ADHD during childhood, data from the CAT will be processed using Generalized Linear Mixed Models (GLMM).

We planned to analyze the possible effect of the following factors on performance of typically developed children and children with ADHD:

- The between-subject factor GROUP: 4 levels (ADHD inattentive, ADHD hyperactive/Impulsive, ADHD Mixt and Control);
- The within-subject factor CUE: 2 levels (CUE: informative vs. uninformative);
- The within-subject factor DISTRACTOR: 4 levels (NoDis, Dis1, Dis2 and Dis3), except for DisRep: 3 levels (Dis1, Dis2 and Dis3).

The AGE factor will be used as a random effect in GLMM.

According to the ADHD form, patients are expected to show different patterns of performance to the CAT. Hypothesis regarding ADHD Inattentive, Hyperactive/Impulsive and Mixed groups' performances compared to the control group are presented below (Tab. 10).

**Tableau 10** : Expected pattern of performances of ADHD patients to the CAT.

| CAT measurements               | Measure type    | Hypotheses of behavioral performance of ADHD patients compared to healthy controls |                       |                | Measured construct              |
|--------------------------------|-----------------|--|-----------------------|----------------|---------------------------------|
|                                |                 | Inattentive  | Hyperactive Impulsive | Combined       |                                 |
| General performance (OK)       | %               | ↓ OK rate  | ↓ OK rate             | ↓ OK           | General performance             |
| Processing speed (RT)          | ms              | ↑ RT   | ↓ RT                  | ?              | General performance             |
| Motor control (RandRep)        | %               | =  | ↑ RandRep rate        | ↑ RandRep rate | Motor control                   |
| Reactive impulsivity (CueRep)  | %               | =  | ↑ CueRep rate         | ↑ CueRep rate  | Impulsivity (motor + attention) |
| Proactive impulsivity (AntRep) | %               | =  | ↑ AntRep rate         | ↑ AntRep rate  | Impulsivity (motor + attention) |
| Reactive impulsivity (DisRep)  | %               | =  | ↑ DisRep rate         | ↑ DisRep rate  | Impulsivity (motor + attention) |
| Phasic alertness (RT)          | ms (NoDis-Dis)  | ↓ RT effect  | ↑ RT effect           | ?              | Phasic alertness                |
| Distraction (RT)               | ms (Dis3-Dis1)  | ↑ RT effect  | =                     | ↑ RT effect    | Involuntary attention           |
| Distraction (LateRep)          | % (Dis-NoDis)   | ↑ LateRep rate   | =                     | ↑ LateRep rate | Involuntary attention           |
| Distraction (MissRep)          | % (Dis-NoDis)   | ↑ MissRep rate   | =                     | ↑ MissRep rate | Involuntary attention           |
| Voluntary orienting (RT)       | ms (Uninf-Inf)  | ↓ RT effect  | =                     | ↓ RT effect    | Voluntary attention             |
| Attentional lapses (LateRep)   | % (NoDis)       | ↑ LateRep rate   | =                     | ↑ LateRep rate | Voluntary attention             |
| Attentional lapses (MissRep)   | % (NoDis)       | ↑ MissRep rate   | =                     | ↑ MissRep rate | Voluntary attention             |
| Sustained attention (SD RT)    | ms (écart-type) | ↑ SD RT  | =                     | ↑ SD RT        | Voluntary attention             |



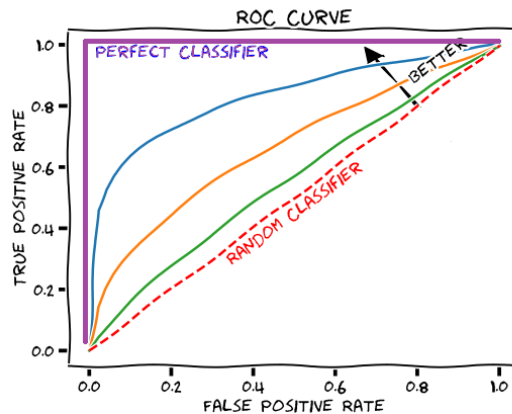
## Predictive validity

In order to evaluate the criterion validity of the CAT, we will compare the patient's attention scores to the diagnosis outcome: this refers to the predictive validity methods. These methods aim to prove the CAT measurements sensitivity and specificity for detecting ADHD symptoms in clinical populations. Pathological scores obtained through the CAT should be coherent with a positive diagnosis of ADHD.

We plan to calculate true and false positive rates (Fig. 49), and estimate the ability of the CAT measurements to discriminate healthy and clinical populations using Receiver Operating Characteristics (ROC) curves (see Fig. 50 for basic principles of ROC curves). These analyses will allow us to compute the sensibility and specificity of the CAT, and will then contribute to prove the reliability of each measurement. This analysis should indicate which combination of CAT measurements is the most predictive of the diagnosis.

|                             |          | Assessment According to Gold Standard |                            |
|-----------------------------|----------|---------------------------------------|----------------------------|
|                             |          | Disease present                       | Disease absent             |
| Result of Test or Treatment | Positive | <b>a</b><br>True positive             | <b>b</b><br>False positive |
|                             | Negative | <b>c</b><br>False negative            | <b>d</b><br>True negative  |

**Figure 49** : False and positive rates. a, Calculation of the true positive rate (a):  $a / (a+c)$ ; sensitivity. b, Calculation of the false positive rate:  $b / (b+d)$ . c, Calculation of the false negative rate:  $c / (a+c)$ . d, Calculation of the true negative rate:  $d / (b+d)$ ; specificity (False False Positive Rates | NEJM, n.d.).



**Figure 50** : Schematic representation of Receiver Operating Characteristics (ROC) curves. The ROC curves allow to dissociate good and bad classifiers; they can be used to estimate the sensitivity and specificity of psychometric tools (“Measuring Performance,” 2019).

### ***Clinical concurrent validity***

Furthermore, we plan to compare the clinical scores provided by the CAT to others attention test scores from the neuropsychological evaluation performed at the hospital (e.g., KiTAP, CPT). These comparisons aim to prove the criterion validity of the CAT using the clinical concurrent validity method. We expect that the CAT’s and other tests’ scores (in percentile, Z or T scores) assumed to evaluate similar constructs will provide coherent clinical conclusions about the patient’s attention efficiency (e.g. if the CAT assessment provides a pathological sustained attention score, scores from other clinical tests evaluating sustained attention should also be pathological).

### ***Normative data***

Importantly, for allowing comparison between a single patient performance and those from a healthy population sample, we computed norms for several behavioral measurements that should be useful for clinical purposes (see Tab. 11).

**Tableau 11** : Measurements of clinical interest provided by the CAT.

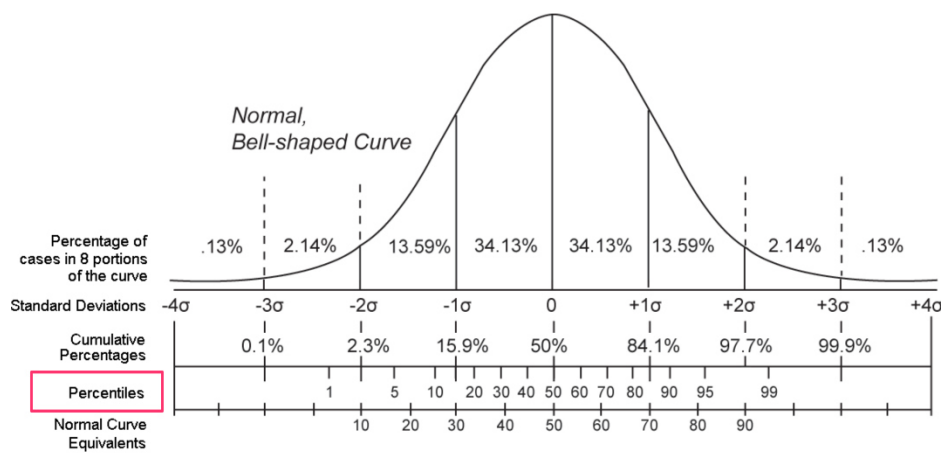
| Measures  | Data type | Experimental conditions | Measured construct  |
|---|-----------|-------------------------|---|
| Mean standard deviation of positive RT (p-RT)         | ms        | NoDis                   | Sustained attention   |
| Mean standard deviation of p-RT block1                | ms        | NoDis                   | Quality of sustained attention through time                 |
| Mean standard deviation of p-RT block2                | ms        | NoDis                   | Quality of sustained attention through time                 |
| Mean standard deviation of p-RT block3                | ms        | NoDis                   | Quality of sustained attention through time                 |
| Median of p-RT  | ms        | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    | Processing speed  |
| Median of p-RT NoDis - Median of p-RT Dis1            | ms        | NoDis-Dis1              | Phasic alertness (i.e. arousal facilitation effect)         |
| Median of p-RT Dis3 - Median of p-RT Dis1             | ms        | Dis3-Dis1               | Distraction (i.e. deleterious effect of distraction)        |
| Median of p-RT NoDis Uninf - Median of p-RT NoDis Inf | ms        | NoDisUninf-NoDisInf     | Orientation and anticipation                                |
| Correct responses                                     | %         | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    | General performance indicator                               |
| Cue responses   | %         | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    | Reactive impulsivity to relevant stimuli                    |
| Random responses                                      | %         | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    | Motor control in absence of stimuli                         |
| Distractor responses                                  | %         | Dis1+Dis2+Dis3          | Reactive impulsivity to irrelevant stimuli                  |
| Anticipated responses                                 | %         | NoDis+Dis1+Dis2+Dis3    | Proactive impulsivity to relevant stimuli                   |
| Missed responses                                      | %         | NoDis                   | Propensity of attentional lapses in absence of distractors  |
| Missed responses                                      | %         | NoDis-Dis               | Propensity of attentional lapses in presence of distractors |
| Late responses  | %         | NoDis                   | Propensity of attentional lapses in absence of distractors  |
| Late responses block1                                 | %         | NoDis                   | Quality of sustained attention through time                 |
| Late responses block2                                 | %         | NoDis                   | Quality of sustained attention through time                 |
| Late responses block3                                 | %         | NoDis                   | Quality of sustained attention through time                 |
| Late responses  | %         | NoDis-Dis               | Propensity of attentional lapses in presence of distractors |

According to age (14 groups from 6 to 25yo), we tested the normality of the distribution of each behavioral measurement mentioned in the table below from data collected for the Study 1. Because most of the distributions were not found following a Gaussian normal law (see Tab. 12 for Shapiro test results according to each measurements distribution by age), measures were ranked and percentiles associated with these values were calculated (see Fig. 51: possible methods for extracting norms based on the data distribution).

**Tableau 12** : Results of the Shapiro tests performed to estimate the normality of the CAT measurement distributions. The table reports the p values for performed Shapiro tests. The red highlighting means that data were not normally distributed, while green indicates a normal data distribution. If the data distribution is normal, Z and T scores (calculated using standard deviation) can be used to compare the patient performance to the norm. If the data distribution is not normal, percentiles can be used instead of Z and T scores.

| Age   | MissRep NoDis | MissRep Dis | MissRep Dis-NoDis | LateRep NoDis | LateRep Dis | LateRep Dis-NoDis | Correct AllDis | RandRep AllDis | AntRep AllDis | CueRep AllDis | DisRep Dis | SD RT NoDis | Median RT AllDis | Arousal effect Median RT NoDis-Dis1 | Distraction effect Median RT Dis3-Dis1 | Orienting effect Median RT Uninf-Inf |
|-------|---------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|------------|-------------|------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 6     | 0.001051      | 3.166e-05   | 3.856e-05         | 0.04656       | 0.2037      | 0.008174          | 0.008618       | 9.388e-07      | 0.0003409     | 7.675e-08     | 0.0001185  | 0.2975      | 0.8416           | 0.2589                              | 0.3042                                 | 0.0004371                            |
| 7     | 0.0196        | 1.15e-07    | 1.389e-07         | 0.3177        | 0.0004588   | 0.8441            | 0.04922        | 0.000321       | 0.04675       | 2.402e-07     | 0.000452   | 0.2739      | 0.02824          | 0.9734                              | 0.8291                                 | 0.5705                               |
| 8     | 7.574e-06     | 7.013e-07   | 2.25e-06          | 0.5346        | 0.006317    | 0.4706            | 0.2749         | 0.0003961      | 0.6462        | 8.683e-09     | 0.001177   | 0.4631      | 0.007644         | 0.05536                             | 0.5333                                 | 0.8005                               |
| 9     | 5.731e-06     | 1.548e-09   | 7.833e-06         | 0.3157        | 0.02869     | 0.3993            | 0.03923        | 0.001011       | 0.0211        | 9.205e-07     | 5.245e-05  | 0.06155     | 0.02305          | 0.4996                              | 0.005201                               | 0.4055                               |
| 10    | 7.663e-10     | 9.478e-08   | 4.007e-07         | 0.6461        | 3.014e-07   | 0.3426            | 0.08566        | 1.643e-05      | 0.09605       | 1.083e-06     | 2.085e-06  | 0.0002303   | 0.2413           | 0.006913                            | 0.02436                                | 0.5377                               |
| 11    | 6.065e-07     | 1.938e-06   | 0.172             | 0.9193        | 0.004705    | 0.6089            | 0.022          | 2.934e-06      | 0.006138      | 9.892e-06     | 0.009848   | 0.294       | 0.3414           | 0.1535                              | 0.9567                                 | 0.8402                               |
| 12    | 3.929e-07     | 1.316e-07   | 1.504e-06         | 0.3434        | 0.0001678   | 0.007802          | 0.02333        | 1.483e-05      | 0.01276       | 3.317e-06     | 2.896e-05  | 0.005642    | 0.3297           | 0.7257                              | 0.2135                                 | 0.8608                               |
| 13    | 3.142e-07     | 2.648e-07   | 0.01163           | 0.1769        | 0.003038    | 0.809             | 0.03882        | 6.964e-07      | 0.0008283     | 0.0007758     | 4.717e-05  | 0.3504      | 0.06103          | 0.03315                             | 0.3412                                 | 0.1095                               |
| 14    | 1.973e-06     | 2.689e-06   | 0.000428          | 0.8978        | 0.008165    | 0.4982            | 0.001747       | 1.105e-07      | 0.1061        | 1.668e-07     | 0.000146   | 0.2688      | 0.8029           | 0.4445                              | 0.4793                                 | 0.7811                               |
| 15    | 2.288e-06     | 5.721e-07   | 0.0005317         | 0.3661        | 0.01083     | 0.09579           | 0.02133        | 1.924e-05      | 0.0001741     | 1.896e-07     | 0.0003969  | 0.02104     | 0.2526           | 0.1457                              | 0.6009                                 | 0.3128                               |
| 16    | 2.606e-07     | 5.419e-06   | 0.1053            | 0.1702        | 0.01618     | 0.339             | 0.007953       | 3.361e-07      | 0.0006441     | 4.711e-06     | 0.0003014  | 0.004864    | 0.3551           | 0.01474                             | 0.4614                                 | 0.2151                               |
| 17    | 4.368e-07     | 2.989e-09   | 1.812e-06         | 0.3027        | 0.01104     | 0.6037            | 0.003972       | 6.185e-07      | 3.135e-05     | 7.015e-08     | 0.0007801  | 0.001432    | 0.09534          | 0.07118                             | 0.2449                                 | 0.7159                               |
| 18-20 | 4.168e-08     | 5.712e-08   | 9.535e-07         | 0.05067       | 0.006464    | 0.3661            | 0.04924        | 1.532e-06      | 0.000708      | 7.995e-08     | 3.724e-06  | 0.0002457   | 0.3809           | 0.01151                             | 0.1499                                 | 0.1277                               |
| 21-25 | 1.874e-07     | 2.892e-06   | 1.422e-05         | 0.01729       | 0.01589     | 0.0707            | 0.274          | 1.27e-08       | 0.03942       | 1.403e-05     | 0.000479   | 0.002701    | 0.0853           | 0.6484                              | 0.1131                                 | 0.0009317                            |

p > .05    Z or T score possible (normal distribution)  
p < .05    no Z or T score possible (non-normal distribution)



**Figure 51** : Indicators of data dispersion along a Gaussian curve. In the clinical field, these indicators are used to determinate whether the patient's performance is considered as normal or pathological (Nishida, 2018).

To complete the CAT normative data set, we started to collect data in adults from 26 to 90-years-old (currently, N=122). These data could also be used to study changes in distractibility during the course of aging. Even if the investigation of distractibility in aging is out of the scope of the present manuscript, data from this study will allow us to provide a comprehensive understanding of distractibility development along the lifespan (see Discussion section).

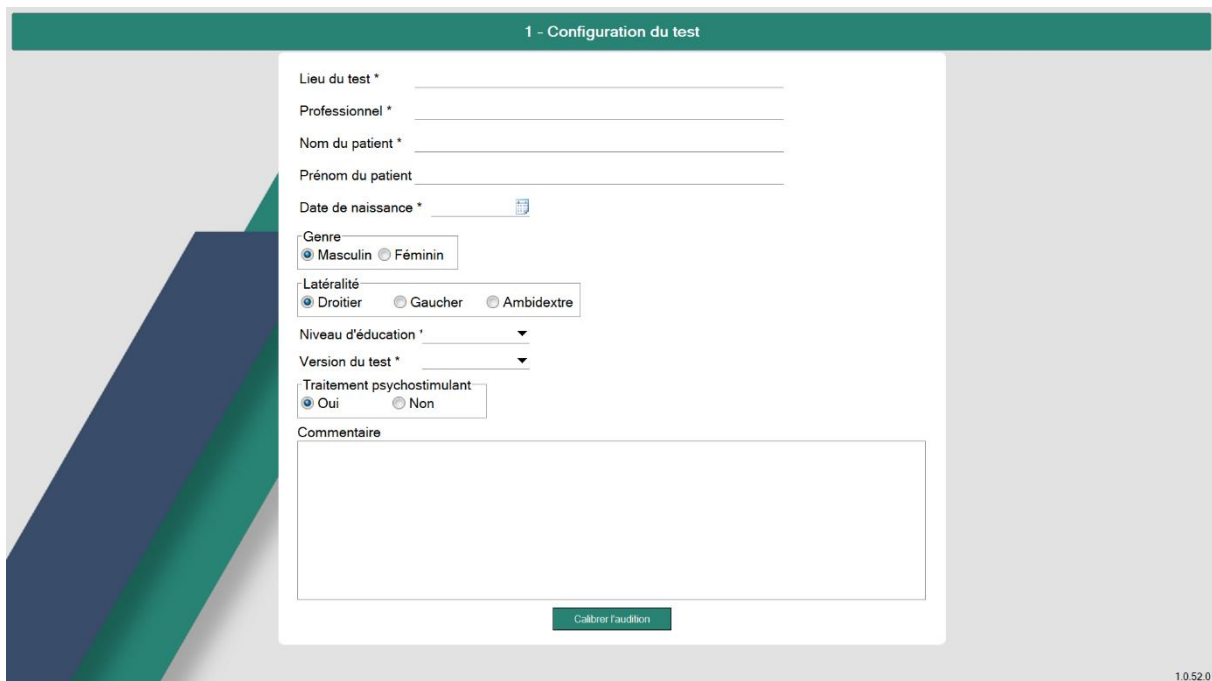
## 4. Construct validity

The construct validity consists in proving that the test assesses the cognitive function that is supposed to be assessed. To prove the construct validity of the CAT, we plan to use convergent and discriminant validity methods. This kind of analysis will also be performed to prove the content validity of the CAT measurements; hence, one kind of analysis can be used to simultaneously prove different types of validity. A positive correlation between measurements provided by the CAT and those from other tests supposed to assess similar attention functions would indicate that the CAT is able to evaluate specific constructs. The absence of correlation patterns between the CAT measurements and other measures from standardized tests or scales, which are believed to assess cognitive facets conceptualized as independent of attentional efficiency (e.g. verbal reasoning), would confirm that the CAT is relevant to evaluate constructs specifically linked to attention (Tab. 11 for additional details). To study the aforementioned patterns of correlations between measurements, we will use data from Study 1, data from collected through the test-retest experiment (see p. 229 for more details) and data from a CAT study in progress in adults from 26 to 90yo. To prove the construct validity of the CAT measurements, we also plan to study their relation with the brain processes measured in Study 3; we then plan to perform correlation analysis between behavioral and brain measurements from the CAT. The link between the different measurements will notably be investigated using the nomological network technic. Taken together, analysis planned to prove the construct validity of the CAT will enable us to determine which measures are the most efficient to assess particular constructs related to distractibility.

## 5. The CAT application

To facilitate this validation procedure, a user-friendly version of the CAT test has been developed in collaboration with the SATT Pulsalys. This computer-based test was developed to respond to clinical demands. The CAT application proposes two versions (A and B) of the test. Several data related to patients can be stocked in and retrieved from encrypted databases through the CAT application interface (e.g. handedness and education level; see Fig. 52 for details). Importantly, this new computer-based test provides an instantaneous result report of the tested participant (Fig. 53), it is then particularly suited for clinical research.

From the participant point of view, the paradigms implemented in this user-friendly application is strictly identical to the paradigms described in Study 1 (p. 114 for details) and in the test-retest procedure (p. 229).



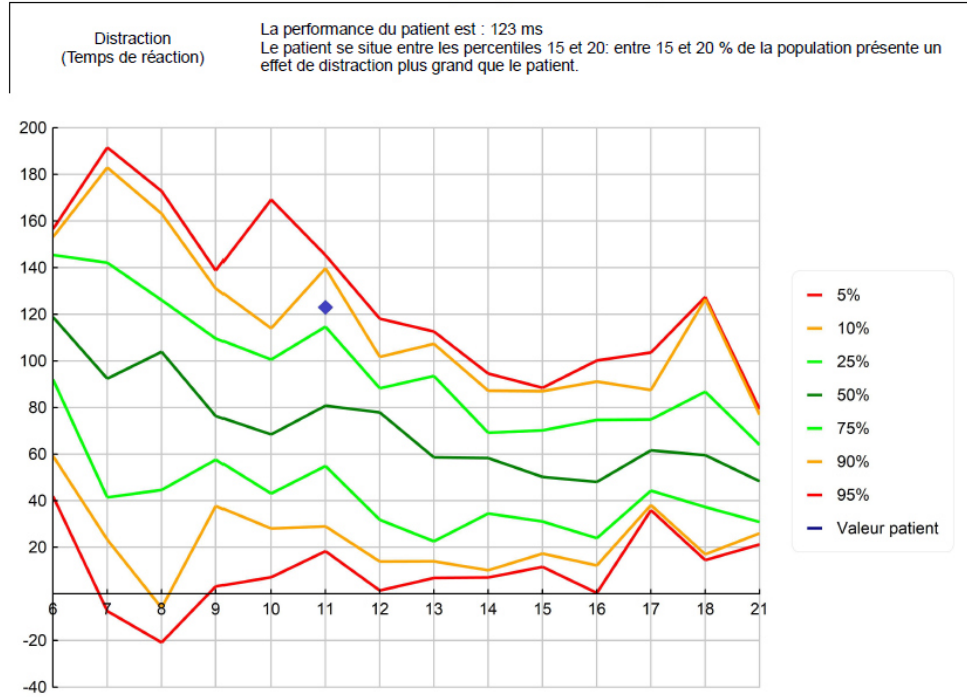
The screenshot shows the '1 - Configuration du test' interface. It includes the following fields and options:

- Lieu du test \* (text input)
- Professionnel \* (text input)
- Nom du patient \* (text input)
- Prénom du patient (text input)
- Date de naissance \* (date input with calendar icon)
- Genre:  Masculin  Féminin
- Latéralité:  Droitier  Gaucher  Ambidextre
- Niveau d'éducation \* (dropdown menu)
- Version du test \* (dropdown menu)
- Traitement psychostimulant:  Oui  Non
- Commentaire (text area)
- Calibrer l'audition (button)

Version: 1.0.52.0

**Figure 52** : Experimenter interface of the CAT application: patient's information and test configuration.

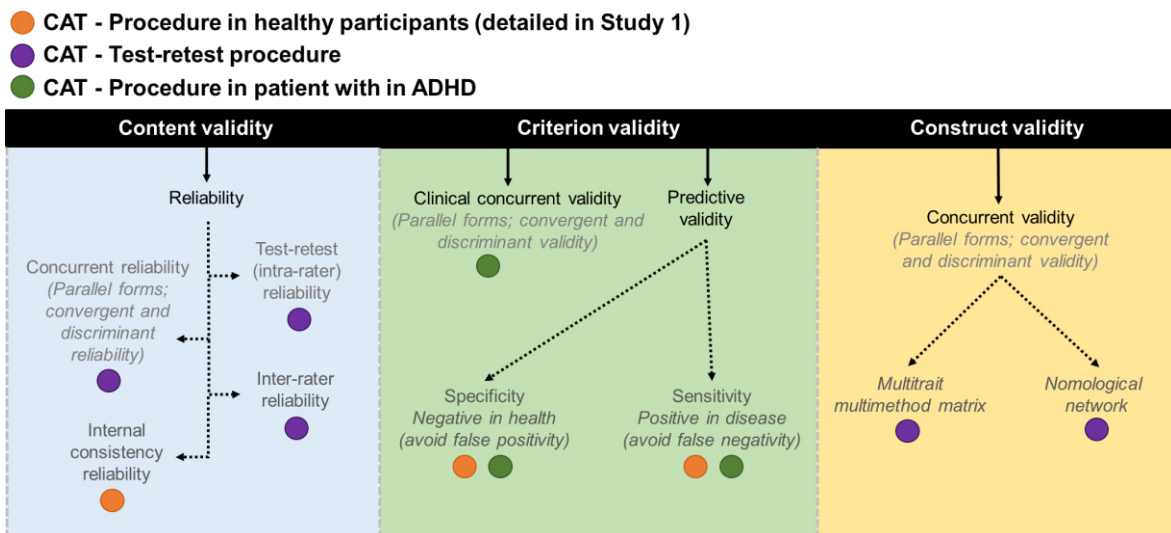
### Distraction (Temps de réaction)



**Figure 53** : The CAT application report: an example using the distraction effect score. The patient (blue point) can be easily compared to the norm thanks to a graphic representation. The red lines (percentile 5) represent the cut off value delineated the frontier between the normal and pathological dimensions. When the patient score moves beyond the percentile 5 or the percentile 95, the cognitive aspect evaluated can be consider as pathological.

## 6. Summary

The methodological approach detailed in the present section will allow testing the validity of the CAT measurements. A summary of the methods and data used to prove the different aspect of the CAT validity is depicted below (Fig. 54). Taken together, these future investigations will enable to prove the content, criterion and construct validity of the CAT. The different procedures that we implemented would then allow to determine the relevance and reliability of the CAT to assess distractibility in clinical settings.



**Figure 54** : Details of the validity types assessed by the CAT validation procedure.



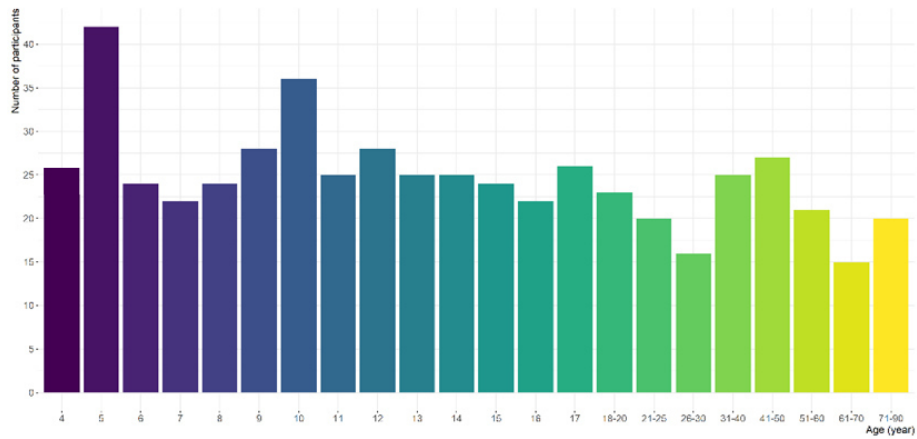
Section V :

# Discussion

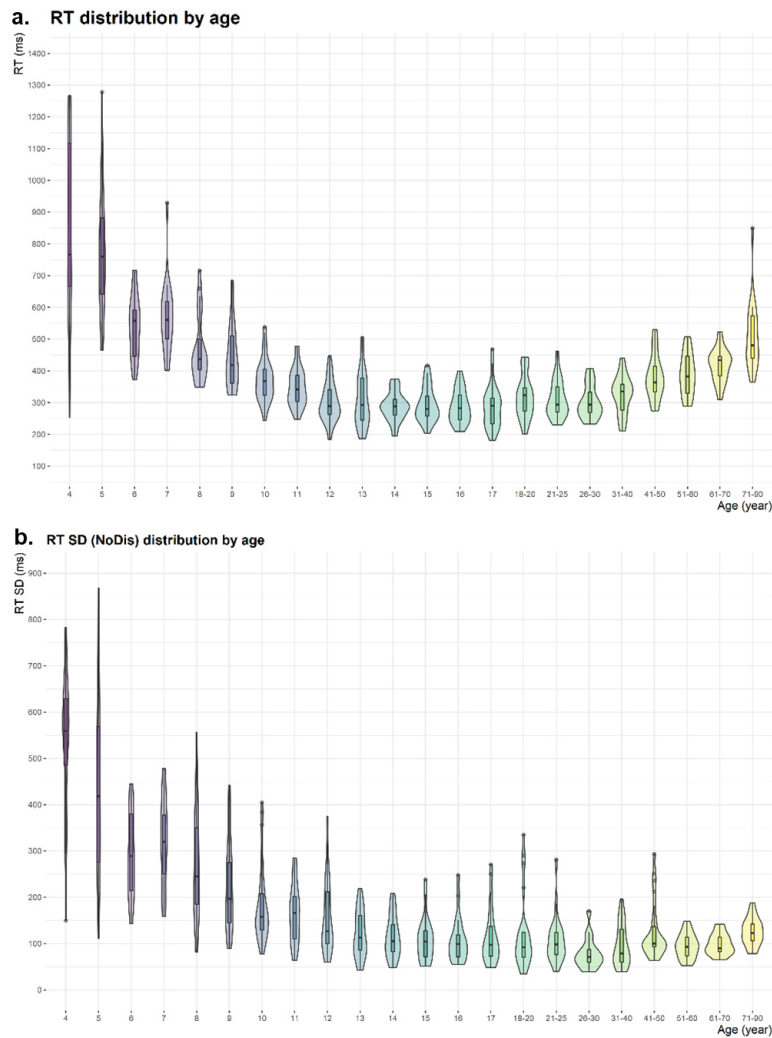
## **Le développement de la distractibilité de l'enfance à l'âge adulte**

Pris dans leur ensemble les résultats des études 1, 2 et 3 sont d'une importance cruciale pour mieux comprendre, d'un point de vue fondamental, comment se manifeste la distractibilité au cours du développement typique de l'enfant. Bien que cette étude ne soit pas finalisée, l'étude visant à compléter la base de données normative du CAT (participants âgés de 26 à 90 ans) permettra de compléter ces résultats et de fournir une bonne visibilité concernant l'évolution des différentes composantes attentionnelles de la distractibilité au cours de la vie. Les données de cette étude sont encore préliminaires, mais les figures suivantes proposent une vision globale des variations des différentes mesures fournies par le CAT de 4 à 90 ans ; les effectifs actuels des populations testées lors des études 1, 2 et pour l'étude de visant à compléter la base de données normative du CAT sont également reportés, par tranche d'âge, dans les figures suivantes (Fig. 54 à 58).

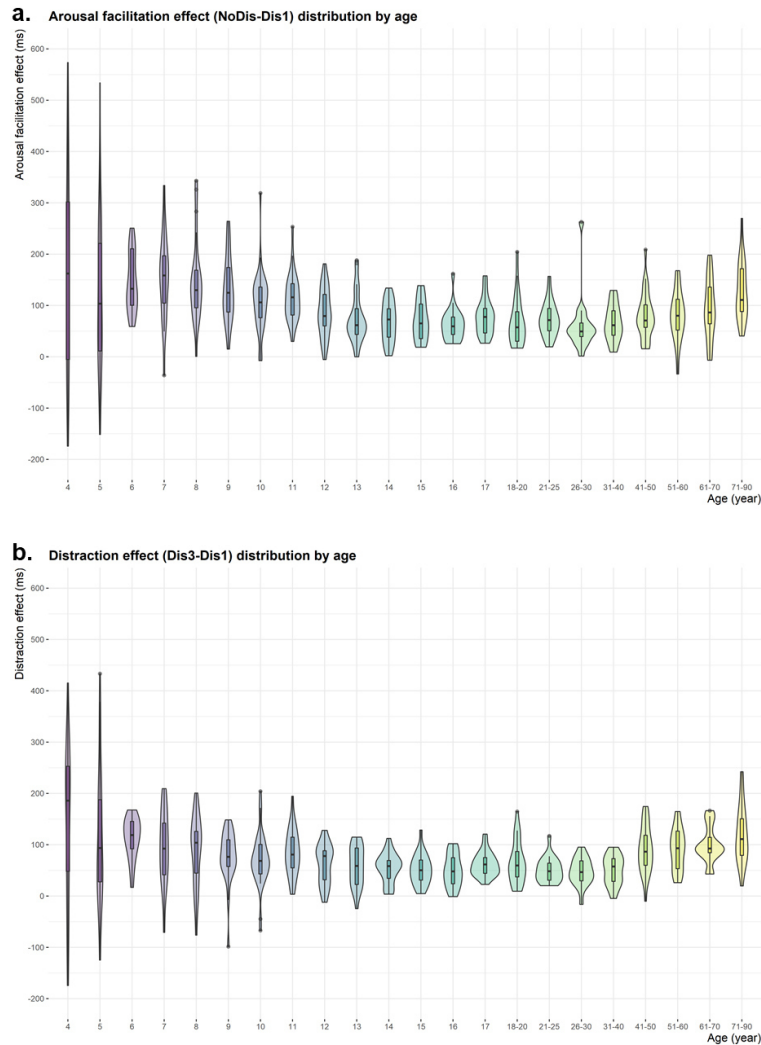
Les premières études (Etude 1 et Etude 2) réalisées lors de ce travail de thèse avaient pour but de combler le manque de connaissances fondamentales concernant la distractibilité chez l'enfant, ce en étudiant les variations de différents marqueurs comportementaux de l'attention en fonction de l'âge. En adaptant les stimuli d'un paradigme utilisé dans le cadre d'études fondamentales en électrophysiologie, nous avons développé un court test comportemental permettant de mesurer différentes composantes comportementales de la distractibilité. La première étude présentée dans ce manuscrit s'intéresse au développement de la distractibilité de 6 ans à 25 ans, la seconde explore son développement entre 4 et 5 ans. Dans le cadre de la procédure de validation du CAT, nous avons également lancé une étude visant à caractériser l'évolution de la distractibilité de 26 à 90 ans.



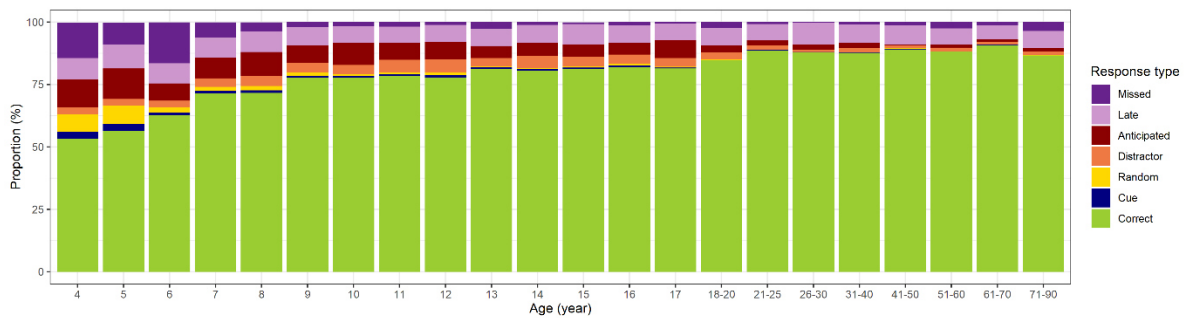
**Figure 55** : Effectifs actuels des populations testées lors des Etudes 1, 2 et de l'étude visant à compléter la base de données normative du CAT en fonction de l'âge. [4 à 90 ans].



**Figure 56** : Les temps de réaction au CAT et leur variabilité à travers l'âge. **a**, Distribution des temps de réaction médians par âge (4 à 90 ans). **b**, Distribution de l'écart type moyen des temps de réaction par âge. La ligne horizontale à l'intérieur de chaque boîte à moustaches représente la médiane, la boîte délimite l'aire entre le premier et le troisième quartile ; un diagramme de densité est juxtaposé à chaque boîte à moustaches.



**Figure 57 :** Effet de facilitation et de distraction sur les temps de réaction à travers l'âge. **a.** Distribution de l'effet de facilitation (NoDis-Dis1) en fonction de l'âge (4 à 90 ans). **b.** Distribution de l'effet de distraction (Dis3-Dis1) en fonction de l'âge. La ligne horizontale à l'intérieur de chaque boîte à moustaches représente la médiane, la boîte délimite l'aire entre le premier et le troisième quartile ; un diagramme de densité est juxtaposé à chaque boîte à moustaches.



**Figure 58 :** Proportion des différents types de réponses au CAT à travers l'âge (4 à 90 ans).

Les études 1 et 2 prouvent tout d'abord que le CAT peut être correctement accompli par des enfants en bas âge. La simplicité du principe de ce test (détection d'un son cible précédé d'un indice visuel ainsi que, parfois, d'un son distracteur) est un de ses avantages majeurs. Malgré sa simplicité, ce test permet la mesure simultanée de différentes composantes attentionnelles interagissant de manière complexe. Pris dans leur ensemble, les résultats de la première et seconde étude de ce manuscrit indiquent que la distractibilité est naturellement accrue durant l'enfance : en d'autres termes, les enfants ont une réaction exacerbée lors de la survenue d'éléments distracteurs dans l'environnement. Les études que nous avons réalisées montrent qu'en fonction de l'âge différents processus attentionnels immatures peuvent être à l'origine de cette réaction accrue au distracteur.

Tant chez l'adulte que chez l'enfant, le distracteur engendre un effet de facilitation sur les TR lié à l'alerte phasique, et un effet délétère communément appelé effet de distraction. Ces deux effets sont identiques chez l'enfant de 4 et 5 ans puis leur trajectoire développementale se dissocierait notamment après 6 ans. Les études 1 et 3 de ce manuscrit rapportent toutes deux que l'effet facilitateur de l'alerte réduit progressivement durant l'enfance. En revanche, l'effet de distraction n'est pas modulé par l'âge dans l'Etude 1, mais connaît une diminution durant l'enfance dans l'Etude 3. D'autres études s'intéressant à l'effet de distraction sur les TR ont également rapporté des résultats contradictoires. Des différences entre les paramètres expérimentaux des paradigmes Oddball majoritairement utilisés lors de ces études pourraient permettre d'expliquer ces contradictions (voir Etude 1 p. 114 pour plus de détail). Le design du CAT a été élaboré de sorte à permettre d'outrepasser ces limites expérimentales mais, ici également, l'Etude 1 et 3 rapportent à première vue des résultats contradictoires. Ces contradictions peuvent notamment être expliquées par les différentes méthodes statistiques utilisées dans l'Etude 1 et 3. Les variations de l'effet de distraction en fonction de l'âge ont été étudié par le biais d'une analyse de type fréquentiste (Kruskall-Wallis) dans l'étude 3. Par contraste, l'Etude 1, comportait une analyse fréquentiste suivie d'une analyse Bayésienne (sur mesures normalisées, voir p. 118 pour plus de détails) : si l'analyse fréquentiste rapporte que l'effet de distraction est significativement ( $p < .05$ ) plus important chez les enfants de 6 ans en comparaison aux 12 à 25 ans, cette différence n'est plus observable sur les scores normalisés après statistiques Bayésiennes. De sorte à maximiser la cohérence entre analyses principales et post-hoc lors de l'Etude 3, nous avons en effet préféré nous fier prioritairement à l'approche fréquentiste pour identifier les effets de l'âge sur les mesures d'alerte et de distraction des TR. Un effet de distraction particulièrement important durant l'enfance pourrait être lié à une capture attentionnelle trop importante, ou à une difficulté

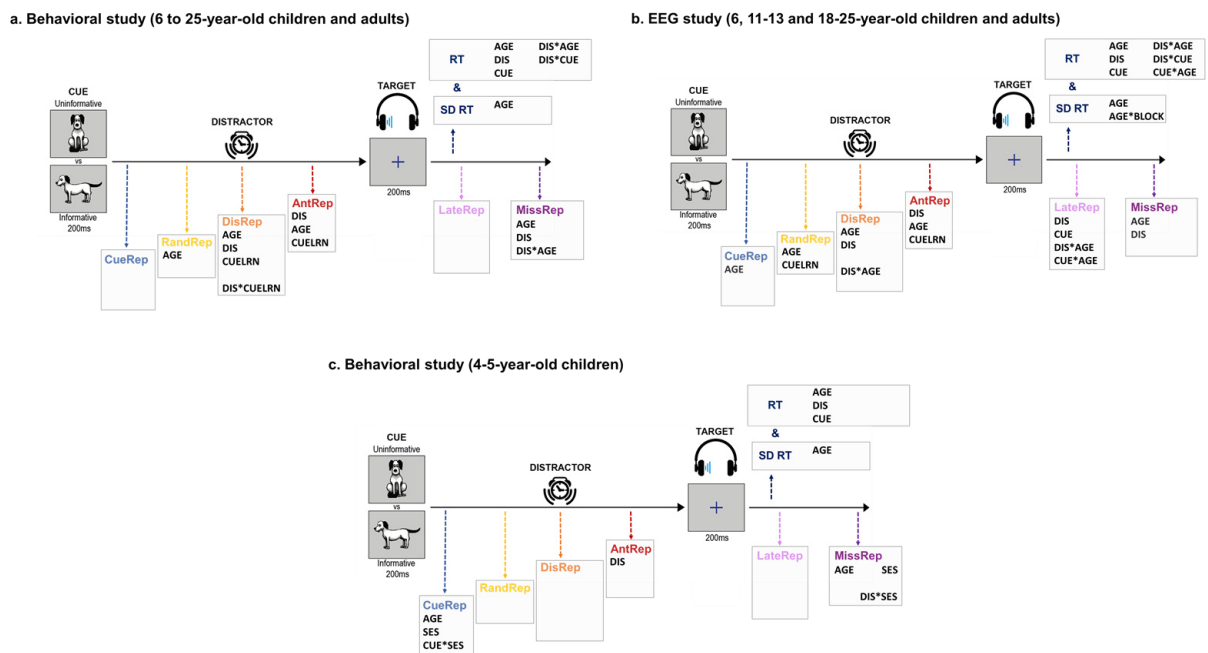
à réorienter volontairement le focus attentionnel sur les éléments pertinents pour réaliser la tâche. Si l'étude des réponses cérébrales émergeant suite à l'apparition du distracteur (notamment P3a précoce et RON) lors du CAT pourrait toutefois permettre de mieux comprendre l'origine de l'effet de distraction sur les TR durant l'enfance, ses mesures comportementales ne permettent pas de trancher en faveur de l'une de ces hypothèses.

Les analyses préliminaires que nous avons réalisées pour explorer le développement cérébral des processus attentionnels indiquent que la distractibilité accrue chez l'enfant se traduirait notamment par un manque d'efficacité du processus de réorientation volontaire de l'attention suite à la capture involontaire de l'attention par un distracteur (réponse RON plus courte chez l'adulte que chez l'enfant et l'adolescent). De plus, le développement des capacités attentionnelles serait associé à un phénomène de maturation cérébrale permettant à l'enfant de basculer progressivement d'une stratégie de contrôle cognitif réactive à une stratégie de contrôle proactive. Le traitement des cibles est augmenté chez les enfants de 6 ans lorsque la position spatiale de cette cible est peu prédictible (augmentation de la P3b en réponse à la cible en condition non-informative).; en revanche, le traitement cérébral de la cible est augmenté chez les adolescents de 11-13 ans lorsque la position spatiale de cette dernière est attendue (augmentation de la N1 à la cible en condition informative). Les analyses plus fines que nous réaliserons pour finaliser cette étude (notamment : analyse en composantes principales, comparaison des topographies et des latences des PE d'intérêt mentionnés dans l'Etude 3, corrélation entre les mesures comportementales et cérébrales) nous permettront de définir avec précision l'origine cérébrale de la distractibilité accrue observable chez l'enfant.

Bien que les analyses statistiques de l'étude visant à compléter la base de données normative du CAT n'aient pas encore été réalisées, l'inspection visuelle de la distribution des TR suggère la présence d'un ralentissement de la vitesse de traitement à partir de 40 ans (Fig. 56) ; la capacité à maintenir l'attention au cours du temps serait en revanche plutôt stable de 26 à 70 ans puis diminuerait après 70 ans (Fig. 57). L'effet facilitateur de l'alerte phasique sur les TR semble pour sa part connaître une augmentation progressive après 50 ans, tandis que l'effet délétère de distraction augmenterait particulièrement à partir de 40 ans, puis connaîtrait un accroissement progressif à partir de 50 ans. La visualisation des proportions des différents types de réponses au CAT à travers l'âge (Fig. 58) suggère que le taux de réponse correct est stable de 21 à 70 ans. Le taux de réponses manquées semble augmenter légèrement à partir de 70 ans, tandis que le taux de réponses tardives semble plutôt stable de 6 à 90 ans. Le taux de réponses anticipées à la

cible et de réponses au distracteur diminue progressivement de 4 à 21 ans ; le taux de réponses à l'indice diminue de manière plutôt importante entre 5 et 6 ans ; enfin, si les réponses aléatoires s'observent particulièrement durant l'âge préscolaire, elles se font drastiquement plus rares à partir de 6 ans et disparaissent à l'âge de 10 ans. Si certaines études s'intéressant aux corrélats cérébraux de la distractibilité au cours du vieillissement indiquent une baisse d'efficacité des mécanismes de suppression volontaires du traitement des distracteurs chez la personne âgée (ElShafei, Fornoni, et al., 2018), la visualisation des données préliminaires de cette étude suggère que cette baisse d'efficacité de l'attention volontaire se traduirait notamment par une augmentation de l'effet délétère de distraction sur les RT à partir de 40 ans ainsi qu'une augmentation de la variabilité des TR et possiblement des réponses manquées à partir de 70 ans.

Pris dans leur ensemble, les résultats des études 1, 2, 3 et la visualisation des données préliminaires de l'étude chez des participants de 26 à 90 ans suggèrent que les TR sont des marqueurs exploitables pour étudier les différences de distractibilité de l'enfance à l'âge adulte, tandis que les proportions de réponses seraient des indicateurs pertinents uniquement durant l'enfance. Différents types de réponses comportementales se sont en effet montrés plus sensibles pour caractériser le développement de la distractibilité chez l'enfant d'âge préscolaire (e.g. réponses manquées) ou chez l'adolescent (e.g. réponses aux distracteurs et réponses anticipées). Les résultats obtenus pour chaque mesure comportementale lors des études 1, 2 et 3 sont résumés ci-dessous (Fig. 59).

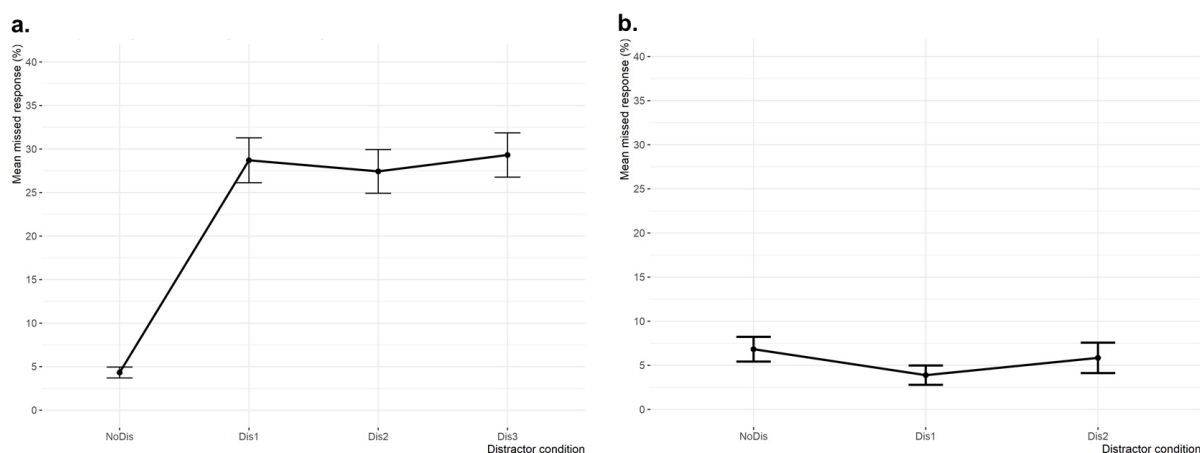


**Figure 59** : Représentation schématique des résultats comportementaux significatifs obtenus lors de l'Etude 1, 2 et 3. **a**, Résultats significatifs au seuil de  $p < .001$  lors de l'Etude 1 (6-25 ans). **b**, Résultats significatifs au seuil de  $p < .05$  lors de l'Etude 3 (6, 11-13 et 18-25 ans). **c**, Résultats significatifs au seuil de  $p < .05$  lors de l'Etude 2 (4-5 ans).

Les résultats que nous avons obtenus lors de l'Etude 1 montrent que les enfants de 6 ans manquent un nombre important de cibles au cours du CAT uniquement lorsque ces dernières sont précédées d'un distracteur. Ces résultats n'ont toutefois pas été répliqués lors de l'Etude 3. Cette dernière étude indique en effet que les enfants de 6 ans manquent plus de cibles que leurs pairs plus âgés de 11 à 13 ans et que les adultes, mais ceci indépendamment de la présence ou non de distracteur dans les essais. Il est possible d'émettre plusieurs hypothèses quant à l'origine de cette contradiction.

Premièrement, la tâche réalisée durant l'Etude 2 est fondamentalement plus longue (16 blocs de 48 min) que celle réalisée dans l'Etude 1 (16 min) ; sachant que les enfants les plus jeunes présentent des difficultés d'attention soutenue, il est possible qu'après 15 min de tâche, l'attention soutenue des enfants de 6 ans est si labile qu'ils manquent autant de cibles dans les essais avec et sans distracteur. Ainsi, la comparaison des taux de réponses manquées entre les groupes d'enfants de 6 ans des études 1 et 3 devrait donc se faire sur la base des 12 premières minutes de tâche seulement. La visualisation de l'effet des distracteurs sur les réponses manquées pendant les 12 premières minutes de la tâche de l'Etude 3 chez les enfants de 6 ans (Fig. 60) suggère toutefois que la durée de la tâche ne permet pas d'expliquer les différences de résultats entre l'Etude 1 et 3.





**Figure 60** : Taux moyen de réponses manquées au CAT, en fonction du distracteur, chez l'enfant de 6 ans. **a.** Réponses manquées chez l'enfant de 6 ans pour l'Etude 1. **b.** Réponses manquées chez l'enfant de 6 ans pour l'Etude 3.

Les divergences de résultats concernant les taux de réponses manquées selon les conditions du distracteur chez les enfants de 6 ans pourraient également s'expliquer par une différence de contexte dans lequel la tâche est réalisée. Si les enfants de l'Etude 1 ont réalisé le CAT volontairement sans qu'aucune gratification ne leur soit donnée en échange, les enfants de l'Etude 3 savaient qu'ils pourraient obtenir des jeux et jouets s'ils terminaient l'expérience (ou non, mais cela ne leur était pas précisé pour entretenir leur motivation). Au vu du comportement des enfants durant le déroulement des sessions expérimentales, il est absolument évident que la perspective d'obtenir une récompense pour leur participation a grandement contribué à leur motivation pour réaliser au mieux la tâche proposée (ceci doit également être gardé à l'esprit lors de la considération des résultats de l'étude 2). Dans le cerveau, la récompense en provenance de l'environnement extérieur entraîne des changements internes se manifestant notamment par des changements dans l'activité du système dopaminergique (voie mésolimbique). La récompense à obtenir pourrait entraîner une augmentation de la libération de dopamine durant la tâche, notamment au niveau préfrontal, permettant aux enfants d'inhiber plus efficacement le traitement des distracteurs. Cette sensibilité à la récompense chez l'enfant a notamment été discuté dans le cadre des études portant sur les jeux vidéo : si l'enfant présente des difficultés à se concentrer sur des tâches ne lui apportant pas de bénéfice immédiat (e.g. faire ses devoirs à la maison), il lui est pourtant aisé de passer plus de deux heures à réaliser très efficacement les différents niveaux de son jeu sur console.

Enfin, la troisième hypothèse pouvant être avancée pour expliquer la divergence de résultats entre les effets du distracteur sur les réponses manquées chez le jeune enfant est celle du milieu socio-économique (MSE). Si les enfants de 6 ans de l'Etude 1 viennent de MSE variés, les enfants de l'Etude 3 sont particulièrement issus de MSE considérés comme élevés. Durant le développement, les performances attentionnelles pourraient en effet différer en fonction à la fois de l'âge mais aussi du MSE de l'enfant (pour un exemple voir Etude 2). D'autres études portant sur les spécificités des performances attentionnelles des enfants en fonction du MSE doivent néanmoins être menées pour pouvoir confirmer ou infirmer l'hypothèse d'une possible influence du MSE sur les taux de réponses manquées au CAT.

Le test CAT est un outil comportemental intéressant car il permet de mesurer différents taux de réponses incorrectes (e.g. réponses à l'indice, au distracteur) qui varient significativement en fonction de l'âge.

De 4 à 5 ans, la capacité à maintenir le focus attentionnel est si peu développée que l'enfant manque un nombre important d'informations en présence, ou non, de distracteurs. Cette forme soutenue de l'attention connaît un développement qualitatif entre 4 et 5 ans, qui se traduit notamment par une réduction de la variabilité des TR aux stimuli pertinents. A 6 et 7 ans, l'attention soutenue continue à se développer : les cibles sont mieux détectées lorsqu'aucun distracteur n'est présent, et la variabilité de la vitesse de réponse commence à se stabiliser au cours du temps. Ce développement progressif de l'attention soutenue se poursuit jusqu'à 12 ans.

Alors que le nombre d'informations manquées pour cause de distraction réduit fortement à partir de 8 ans, le distracteur engendre avant cet âge et jusqu'à 13, un effet très important d'alerte phasique. Un niveau d'alerte trop important a été associé à l'expression de réponses impulsives, non réfléchies, à des stimuli tant pertinents que non pertinents. Entre 8 et 13 ans, la distractibilité accrue se manifeste par des réponses impulsives en réaction aux stimuli distracteurs et en anticipation de stimuli pertinents. A partir de 14 ans et plus tard dans l'adolescence, la distractibilité exacerbée se traduit par une difficulté à anticiper précisément l'apparition de la cible, mais l'enfant cesse de réagir impulsivement aux distracteurs.

D'un point de vue cérébral, la visualisation des données de l'Etude 3 laisse penser que la distractibilité accrue chez l'enfant serait la conséquence de l'immaturation des mécanismes attentionnels volontaires et involontaires. La finalisation des tests prévus pour cette étude et l'analyse des PE des participants de 6, 11-13 et 18-25 ans en réponse

aux indices, distracteurs et cibles au cours du CAT nous permettra de caractériser précisément le développement des mécanismes cérébraux à l'origine des changements de distractibilité durant l'enfance. Les marqueurs cérébraux de la distractibilité identifiés dans cette étude pourront notamment être utilisés pour affiner les programmes de réhabilitation cognitive basés sur les techniques de neurofeedback (e.g. Fouillen, 2019).

## **Influence de l'environnement socio-économique sur le développement de l'attention**

Le développement cérébral de l'enfant est intrinsèquement sous-tendu par ce qu'il vit au quotidien dans son environnement. L'influence du MSE de l'enfant est un sujet abordé dans l'Etude 2 mais non discuté dans l'introduction. Durant ce travail de thèse, la problématique du MSE dans le développement des fonctions attentionnelles a émergée lors de discussions avec Christina Karns et Eric Pakulak, du Brain Development Lab de l'Université de l'Oregon (USA). Les travaux de recherche réalisés par ces chercheurs et leur équipe ont notamment montré que l'influence du MSE pouvait se traduire par des différences de fonctionnement attentionnel observables très tôt durant le développement de l'enfant (D'Angiulli et al., 2008; Giuliano et al., 2018; Hampton Wray et al., 2017; Pakulak et al., 2018; Stevens et al., 2009). Pour caractériser le développement de l'attention durant l'âge préscolaire et en fonction du MSE, nous avons réalisé une étude chez de jeunes enfants américains de 4 à 5 ans venant de MSE considérés comme plutôt bas ou élevés. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un séjour doctoral de quatre mois à l'Université de l'Oregon, sous la supervision de Christina Karns et Eric Pakulak.

Les résultats que nous avons obtenus lors de l'Etude 2 indiquent de manière générale que les enfants issus de bas MSE présenteraient notamment des capacités réduites d'attention soutenue, ainsi qu'une impulsivité plus importante aux stimuli non cibles se présentant dans l'environnement. Du fait que les individus de bas MSE présentent couramment généralement de différences cérébrales et cognitives affectant leur capacité d'organisation et de contrôle comportemental au quotidien (Chan et al., 2018; Hostinar et al., 2015; Pakulak et al., 2018), leurs enfants seraient naturellement plus régulièrement exposés à diverses situations imprévues et parfois stressantes. Ainsi, les fonctions attentionnelles de l'enfant de bas MSE pourraient se développer de sorte à lui permettre de réagir le plus efficacement possible aux changements se produisant fréquemment dans son environnement. Pour permettre une inspection attentionnelle constante et modérément poussée de l'environnement, l'attention volontaire doit pouvoir être aisément interrompue. Si le focus attentionnel déployé sur la tâche est trop important, l'enfant risque de rater certaines informations non pertinentes pour la tâche survenant hors du focus mais qui peuvent toutefois s'avérer utiles ou vitales pour gérer une situation imprévue. Si ce fonctionnement n'est pas adapté au contexte scolaire en général, il est toutefois important de garder à l'esprit qu'il peut sous-tendre un processus d'adaptation à l'environnement

familial. Les différences de fonctionnement attentionnel induites par le MSE peuvent donc être considérées comme adaptatives.

Sachant que la caractérisation des MSE dépend principalement du pays de résidence des individus, il est à noter que l'Etude 2 se base sur une classification américaine des MSE. Plus précisément, les enfants considérés comme issus de bas MSE ont été recrutés au sein d'établissements scolaires créés par l'association Head Start of Lane County pour permettre aux plus défavorisés de scolariser gratuitement leurs enfants. En France, la différence entre les établissements privés et publics ne reflète pas la différence entre établissements gratuits et payants aux USA. Ceci souligne le fait que, pour pouvoir être tout à fait généralisables, les résultats de l'Etude 2 devraient être répliqués sur des échantillons de population de pays différents.

Loin d'être une fatalité, les difficultés attentionnelles des enfants issus de MSE plutôt bas peuvent être entraînées pour permettre une augmentation de leur efficacité, particulièrement en milieu scolaire. L'équipe de Christina Karns et Eric Pakulak a développé de tels programmes d'entraînement et a testé leurs effets sur les capacités cognitives de jeunes enfants venant de bas MSE : les résultats qu'ils ont obtenus montrent que ce type d'outil pourrait permettre de compenser les différences attentionnelles liées au MSE (H. Neville et al., 2008; H. J. Neville et al., 2013). Le CAT pourrait ainsi être un outil pertinent pour estimer les capacités attentionnelles des jeunes enfants dès leur entrée à l'école. Une telle évaluation pourrait permettre de mettre en place, si nécessaire, des programmes d'entraînement individualisés permettant aux enfants de compenser les éventuelles difficultés détectées. La détection précoce des difficultés attentionnelles, qu'elles soient considérées comme typiques ou pathologiques est d'une importance cruciale car ces difficultés peuvent lourdement entraver les apprentissages en milieu scolaire classique. Par ailleurs, la détection des déficits pathologiques de l'attention dès le plus jeune âge pourrait permettre une meilleure prise en charge des patients atteints de Trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA-H).

## Vers une meilleure détection des dysfonctionnements de la distractibilité

Les fonctions attentionnelles sont naturellement immatures durant l'enfance. La présence chez un individu de difficultés caractéristiques d'un niveau développemental inférieur à son âge réel marque néanmoins la présence d'un déficit pathologique. Puisque le CAT est un test fournissant des mesures assez fines pour pouvoir caractériser les différences attentionnelles liées à l'âge, ce test pourrait être un nouvel outil clinique pour la détection objective des déficits pathologiques de l'attention, ce notamment dans le cadre du diagnostic du TDA-H.

Il existe très certainement de nombreux tests issus du domaine de la recherche fondamentale qui pourraient être utiles pour le diagnostic d'une large gamme de troubles cognitifs en milieu clinique. Le fait que ces tests ne soient précisément pas utilisés dans la routine clinique en neuropsychologie pourrait notamment s'expliquer de deux manières : les résultats obtenus lors de l'étude fondamentale utilisant le test n'ont pas été répliqués (i.e. leur pertinence peut être remise en question), ou le test n'a pas subi le processus de transfert visant à le faire passer du milieu de la recherche au milieu clinique (i.e. le test doit pouvoir être facilement utilisé par les cliniciens pour comparer les mesures effectuées chez un patient à une norme).

La pertinence de certaines des mesures du CAT peut être remise en question à cause de la rareté de certaines réponses chez les participants des études 1, 2 et 3. On notera notamment la rareté des réponses à l'indice dans les échantillons de population sans troubles neurologiques utilisés pour les études susmentionnées. Certains doutes pourraient donc être émis quant à la valeur de l'effet significatif de l'âge retrouvé sur des réponses très rarement observables (e.g. réponses à l'indice, réponses au distracteur, réponses aléatoires). Il convient néanmoins de préciser que l'approche statistique utilisées dans les études 1, 2 et 3 a été choisie pour pouvoir tenir compte de la rareté de certaines réponses. L'utilisation de modèles linéaires généralisés permet en effet d'analyser des données comme les types de réponses du CAT (codés en 0 ou 1) en considérant à la fois la proportion de réponses effectivement présentées dans une catégorie (codées 1), et la proportion de réponse ne rentrant pas dans cette catégorie (codées 0).

Malgré le fait que nous ayons mis en place les précautions statistiques nécessaires pour ne pas biaiser les résultats de nos études, il convient de rester pragmatique lors de l'interprétation d'un seul et même score à une tâche donnée. En clinique, les mesures

comportementales sont des indicateurs qui doivent être considérés dans leur ensemble et non pas de manière isolée. De nombreux facteurs confondants peuvent influencer les mesures cliniques (e.g. stress de l'évaluation, fatigue). Lorsque différents scores évaluant le même construit cognitif indiquent tous deux la présence d'un déficit, les conclusions de l'évaluation sont plus robustes et permettent de mieux cerner le tableau clinique du trouble. En ce sens, les différentes mesures comportementales fournies par le CAT ne doivent pas être interprétées isolément mais dans leur ensemble. De plus, certains indicateurs à pertinence relative chez des populations saines pourraient s'avérer pertinents pour caractériser les populations cliniques.

Si le CAT n'a pas vocation à révolutionner le diagnostic du TDA-H, son transfert du domaine de la recherche au domaine clinique pourrait néanmoins faciliter l'évaluation des fonctions attentionnelles chez l'enfant lors des bilans neuropsychologiques. A ce jour, la pertinence clinique du CAT reste cependant à démontrer. Dans le but de vérifier la pertinence des mesures de ce test pour l'évaluation des symptômes du TDA-H, et pour s'assurer de la fiabilité de ces mesures, nous avons développé une approche méthodologique visant à établir la validité de contenu, de critère et de construit du CAT, mais également à compléter sa base normative. Une première approche vise à montrer la fiabilité des mesures du CAT chez une population saine en utilisant notamment une méthode de test-retest, tandis qu'une autre a pour objectif de montrer la pertinence des mesures du CAT pour la détection du TDA-H chez l'enfant. Pour des besoins relatifs aux sessions de test-retest, nous avons créé une version parallèle du test. En collaboration avec la SATT Pulsalys nous avons ensuite développé une application ergonomique pour faciliter l'utilisation clinique (le test CAT utilisé en recherche peut être lancé via le logiciel Présentation dont la licence est relativement coûteuse et qui n'est pas adapté pour une utilisation en routine clinique). L'application CAT permet de réaliser, sur ordinateur, le même paradigme que celui qui a été utilisé dans les différentes études comportementales présentées dans ce manuscrit. Nous avons en effet veillé à ce que le test reproduise à l'identique le test utilisé en recherche. L'application CAT propose également la version parallèle du test (version pour laquelle les stimuli relatifs au chien sont remplacés par des stimuli relatifs au chat). L'application contient une base de données comprenant les différentes valeurs en percentiles indexant la distribution des mesures normatives pour chaque catégorie de réponses du CAT en fonction de l'âge (population de l'Etude 1, 6 à 25 ans). Pour compléter cette base de données normative, une nouvelle étude utilisant le CAT chez des participants de 26 à 90 ans est en cours.

Le test CAT est actuellement protégée par une marque (CoLeT ; référence 4637423). L'application CAT permettra aux cliniciens d'intégrer le test dans leur routine clinique lors de bilans neuropsychologiques réalisés dans le cadre de la démarche de diagnostic du TDA-H. En collaboration avec différentes unités hospitalières, nous souhaitons mesurer la spécificité et la sensibilité des mesures du CAT pour la détection du TDA-H. Cette étude permettra également d'étudier, dans une approche fondamentale, les dysfonctions de la distractibilité dans les formes inattentive, impulsive/Hyperactive et mixte du trouble. A ce jour, le test CAT ne remplit pas encore les critères nécessaires pour être utilisé en clinique : la procédure de validation est actuellement en cours. Si ce test permet bien de détecter finement les symptômes du TDA-H durant l'enfance, ses mesures pourraient s'avérer particulièrement pertinentes pour individualiser au mieux la prise en charge médicale des patients souffrant de déficits attentionnels.



## Conclusions et perspectives

La distractibilité qui dépend de l'efficacité de plusieurs composantes attentionnelles se manifeste de manière différente en fonction de l'âge. Ces différences sont mesurables tant au niveau comportemental que cérébral. Pris dans leur ensemble, les résultats du présent travail de recherche indiquent que la distractibilité est naturellement accrue chez l'enfant, mais que certains facteurs comme le niveau socio-économique peuvent toutefois contribuer à exacerber ce phénomène, ce dès le plus jeune âge. Pour permettre de mieux détecter les difficultés et déficits attentionnels durant l'enfance, ce travail avait également pour objectif secondaire la mise en place d'une approche méthodologique visant à valider le CAT. Grâce à la collaboration d'acteurs dans le domaine de la recherche, du secteur médical et du transfert de technologies, nous souhaitons maintenant démarrer une étude clinique qui, dans un futur proche, permettra de vérifier l'intérêt du test CAT pour le diagnostic du TDA-H.

Dans le futur, nous espérons que ce travail pourra avoir une utilité publique, notamment dans le cadre du diagnostic des déficits attentionnels, et pour le développement de nouvelles stratégies de réhabilitation cognitive. En effet, certaines techniques de neurostimulation ciblant des réseaux cérébraux spécifiques sont aujourd'hui considérées comme prometteuses pour entraîner des fonctions cognitives comme, par exemple, la mémoire de travail (e.g. Albouy et al., 2017, 2018). Dans une telle perspective, la neurostimulation des réseaux attentionnels impliqués dans la distractibilité pourrait permettre d'entraîner les facettes attentionnelles associées. Les connaissances issues des travaux présentés dans ce manuscrit pourront ainsi être utilisées dans le cadre de la création de nouveaux programmes d'entraînement cognitif visant à réduire les processus attentionnels dysfonctionnels chez les patients souffrant de TDA-H.

Section VI :

# Références

- Adler, G., & Adler, J. (1989). Influence of stimulus intensity on AEP components in the 80- to 200-millisecond latency range. *Audiology: Official Organ of the International Society of Audiology*, 28(6), 316–324. <https://doi.org/10.3109/00206098909081638>
- Adler, G., & Adler, J. (1991). Auditory stimulus processing at different stimulus intensities as reflected by auditory evoked potentials. *Biological Psychiatry*, 29(4), 347–356. [https://doi.org/10.1016/0006-3223\(91\)90220-G](https://doi.org/10.1016/0006-3223(91)90220-G)
- Albouy, P., Baillet, S., & Zatorre, R. J. (2018). Driving working memory with frequency-tuned noninvasive brain stimulation. *Annals of the New York Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1111/nyas.13664>
- Albouy, P., Weiss, A., Baillet, S., & Zatorre, R. J. (2017). Selective Entrainment of Theta Oscillations in the Dorsal Stream Causally Enhances Auditory Working Memory Performance. *Neuron*, 94(1), 193-206.e5. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.03.015>
- Albrecht, B., Brandeis, D., Uebel, H., Valko, L., Heinrich, H., Drechsler, R., Heise, A., Müller, U. C., Steinhausen, H.-C., Rothenberger, A., & Banaschewski, T. (2013). Familiality of neural preparation and response control in childhood attention deficit-hyperactivity disorder. *Psychological Medicine*, 43(9), 1997–2011. <https://doi.org/10.1017/S003329171200270X>
- Albrecht, R., Suchodoletz, W. v., & Uwer, R. (2000). The development of auditory evoked dipole source activity from childhood to adulthood. *Clinical Neurophysiology*, 111(12), 2268–2276. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(00\)00464-8](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00464-8)
- Alcaini, M., Giard, M. H., Thévenet, M., & Pernier, J. (1994). Two separate frontal components in the N1 wave of the human auditory evoked response. *Psychophysiology*, 31(6), 611–615. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1994.tb02354.x>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed.). Arlington, VA: Author.
- Andrews-Hanna, J. R., Mackiewicz Seghete, K. L., Claus, E. D., Burgess, G. C., Ruzic, L., & Banich, M. T. (2011a). Cognitive control in adolescence: Neural underpinnings and relation to self-report behaviors. *PloS One*, 6(6), e21598. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021598>
- Andri Signorell et mult. al. (2019). DescTools: Tools for Descriptive Statistics. <https://cran.r-project.org/package=DescTools>
- Antonini, T. N., Narad, M. E., Langberg, J. M., & Epstein, J. N. (2013). Behavioral correlates of reaction time variability in children with and without ADHD. *Neuropsychology*, 27(2), 201–209. <https://doi.org/10.1037/a0032071>
- Arnott, S. R., & Alain, C. (2002). Effects of perceptual context on event-related brain potentials during auditory spatial attention. *Psychophysiology*, 39(5), 625–632. <https://doi.org/10.1017.S0048577202394149>

- Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 403–450. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.28.061604.135709>
- Atmaja, B. T. (2019). Report II Human Perceptual System and its Model: The Mechanism on How Auditory System Solves The Cocktail Party Problem.
- Audition—Oreille—Cochlée. (n.d.). Retrieved September 12, 2020, from <http://www.cochlea.eu>
- Auger, N., Lo, E., Cantinotti, M., & O’Loughlin, J. (2010). Impulsivity and socio-economic status interact to increase the risk of gambling onset among youth. *Addiction (Abingdon, England)*, 105(12), 2176–2183. <https://doi.org/10.1111/j.1360-0443.2010.03100.x>
- Bachiller, A., Romero, S., Molina, V., Alonso, J. F., Mañanas, M. A., Poza, J., & Hornero, R. (2015). Auditory P3a and P3b neural generators in schizophrenia: An adaptive sLORETA P300 localization approach. *Schizophrenia Research*, 169(1–3), 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2015.09.028>
- Banaschewski, T., Yordanova, J., Kolev, V., Heinrich, H., Albrecht, B., & Rothenberger, A. (2008). Stimulus context and motor preparation in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychology*, 77(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.09.003>
- 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>
- Barratt, E. S., & Patton, J. H. (1983). Impulsivity: Cognitive, behavioral, and psychophysiological correlates. In M. Zuckerman (Ed.), *Biological bases of sensation seeking, impulsivity and anxiety*. (Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates., pp. 77–122).
- Barry, R. J., Steiner, G. Z., Blasio, F. M. D., Fogarty, J. S., Karamacoska, D., & MacDonald, B. (2020). Components in the P300: Don’t forget the Novelty P3! *Psychophysiology*, 57(7), e13371. <https://doi.org/10.1111/psyp.13371>
- Barry, R. J., Steiner, G. Z., & De Blasio, F. M. (2016). Reinstating the Novelty P3. *Scientific Reports*, 6, 31200. <https://doi.org/10.1038/srep31200>
- Basile, L. F. H., Ballester, G., de Castro, C. C., & Gattaz, W. F. (2002). Multifocal slow potential generation revealed by high-resolution EEG and current density reconstruction. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 45(3), 227–240. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(02\)00014-4](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(02)00014-4)
- Basile, L. F. H., Brunetti, E. P., Pereira, J. F., Ballester, G., Amaro, E., Anghinah, R., Ribeiro, P., Piedade, R., & Gattaz, W. F. (2006). Complex slow potential generators in a simplified attention paradigm. *International Journal of Psychophysiology*, 61(2), 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.09.004>

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beck, D. M., & Kastner, S. (2005). Stimulus context modulates competition in human extrastriate cortex. *Nature Neuroscience*, 8(8), 1110–1116. <https://doi.org/10.1038/nn1501>
- Bender, S., Weisbrod, M., Bornfleth, H., Resch, F., & Oelkers-Ax, R. (2005). How do children prepare to react? Imaging maturation of motor preparation and stimulus anticipation by late contingent negative variation. *NeuroImage*, 27(4), 737–752. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.05.020>
- Berger, A., Jones, L., Rothbart, M., & Posner, M. (2000). Computerized games to study the development of attention in childhood. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers: A Journal of the Psychonomic Society, Inc*, 32, 297–303. <https://doi.org/10.3758/BF03207798>
- Berti, S. (2008). Cognitive control after distraction: Event-related brain potentials (ERPs) dissociate between different processes of attentional allocation. *Psychophysiology*, 45(4), 608–620. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00660.x>
- Berti, S. (2013). The role of auditory transient and deviance processing in distraction of task performance: A combined behavioral and event-related brain potential study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00352>
- 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>
- Betts, J., McKay, J., Maruff, P., & Anderson, V. (2006). The development of sustained attention in children: The effect of age and task load. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 12(3), 205–221. <https://doi.org/10.1080/09297040500488522>
- Bidet-Caulet, A., Fischer, C., Besle, J., Aguera, P.-E., Giard, M.-H., & Bertrand, O. (2007). Effects of Selective Attention on the Electrophysiological Representation of Concurrent Sounds in the Human Auditory Cortex. *Journal of Neuroscience*, 27(35), 9252–9261. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1402-07.2007>
- Bidet-Caulet, Aurélie, Bottemanne, L., Fonteneau, C., Giard, M.-H., & Bertrand, O. (2015). Brain Dynamics of Distractibility: Interaction Between Top-Down and Bottom-Up Mechanisms of Auditory Attention. *Brain Topography*, 28(3), 423–436. <https://doi.org/10.1007/s10548-014-0354-x>
- Bidet-Caulet, Aurélie, Mikyska, C., & Knight, R. T. (2010). Load effects in auditory selective attention: Evidence for distinct facilitation and inhibition mechanisms. *NeuroImage*, 50(1), 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.039>
- Bishop, D. V., Hardiman, M., Uwer, R., & von Suchodoletz, W. (2007). Maturation of the long-latency auditory ERP: Step function changes at start and end of adolescence.

Developmental Science, 10(5), 565–575. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00619.x>

- Blackwell, K. A., & Munakata, Y. (2014). Costs and benefits linked to developments in cognitive control. *Developmental Science*, 17(2), 203–211. <https://doi.org/10.1111/desc.12113>
- Blakemore, S.-J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: Implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 47(3–4), 296–312. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01611.x>
- Blum, K., Chen, A. L.-C., Braverman, E. R., Comings, D. E., Chen, T. J., Arcuri, V., Blum, S. H., Downs, B. W., Waite, R. L., Notaro, A., Lubar, J., Williams, L., Prihoda, T. J., Palomo, T., & Oscar-Berman, M. (2008). Attention-deficit-hyperactivity disorder and reward deficiency syndrome. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 4(5), 893–918.
- Bogadhi, A. R., Bollimunta, A., Leopold, D. A., & Krauzlis, R. J. (2018). Brain regions modulated during covert visual attention in the macaque. *Scientific Reports*, 8(1), 15237. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33567-9>
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Lei, Z., Trommer, B. L., Davenport, N. D., Li, W., Parrish, T. B., Gitelman, D. R., & Mesulam, M. M. (2003). Neural development of selective attention and response inhibition. *NeuroImage*, 20(2), 737–751. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00404-X](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00404-X)
- 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>
- Brandeis, D., Banaschewski, T., Baving, L., Georgiewa, P., Blanz, B., Schmidt, M. H., Warnke, A., Steinhausen, H.-C., Rothenberger, A., & Scheuerpflug, P. (2002). Multicenter P300 Brain Mapping of Impaired Attention to Cues in Hyperkinetic Children. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 41(8), 990–998. <https://doi.org/10.1097/00004583-200208000-00018>
- Brandes-Aitken, A., Braren, S., Swingler, M., Voegtline, K., & Blair, C. (2019). Sustained attention in infancy: A foundation for the development of multiple aspects of self-regulation for children in poverty. *Journal of Experimental Child Psychology*, 184, 192–209. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.04.006>
- Brinkman, M. J. R., & Stauder, J. E. A. (2007). Development and gender in the P50 paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 118(7), 1517–1524. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.002>
- Brinkman, M. J. R., & Stauder, J. E. A. (2008). The development of passive auditory novelty processing. *International Journal of Psychophysiology*, 70(1), 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.04.005>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication* (pp. v, 340). Pergamon Press. <https://doi.org/10.1037/10037-000>

- Brown, T. T., & Jernigan, T. L. (2012). Brain development during the preschool years. *Neuropsychology Review*, 22(4), 313–333. <https://doi.org/10.1007/s11065-012-9214-1>
- Bruneau, N., & Gomot, M. (1998). Auditory evoked potentials (N1 wave) as indices of cortical development. In B. Garreau (Ed.), *Neuroimaging in child neuropsychiatric disorders* (pp. 113–123). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-95848-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-95848-9_10)
- Bruneau, N., Roux, S., Guérin, P., Barthélémy, C., & Lelord, G. (1997). Temporal prominence of auditory evoked potentials (N1 wave) in 4-8-year-old children. *Psychophysiology*, 34(1), 32–38. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02413.x>
- Brunia, C. H. M. (1999). Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, 101(2–3), 213–242. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(99\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(99)00006-2)
- Brunia, C. H., & van Boxtel, G. J. (2001b). Wait and see. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 43(1), 59–75. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(01\)00179-9](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(01)00179-9)
- Burrows, B. E., & Moore, T. (2009). Influence and Limitations of Popout in the Selection of Salient Visual Stimuli by Area V4 Neurons. *The Journal of Neuroscience*, 29(48), 15169–15177. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3710-09.2009>
- Bush, G., Frazier, J. A., Rauch, S. L., Seidman, L. J., Whalen, P. J., Jenike, M. A., Rosen, B. R., & Biederman, J. (1999). Anterior cingulate cortex dysfunction in attention-deficit/hyperactivity disorder revealed by fMRI and the Counting Stroop. *Biological Psychiatry*, 45(12), 1542–1552. [https://doi.org/10.1016/s0006-3223\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/s0006-3223(99)00083-9)
- Campbell, D. T., & Fiske, D. W. (1959). Convergent and discriminant validation by the multitrait-multimethod matrix. *Psychological Bulletin*, 56(2), 81–105. <https://doi.org/10.1037/h0046016>
- Carver, A. C., Livesey, D. J., & Charles, M. (2001). Age related changes in inhibitory control as measured by stop signal task performance. *The International Journal of Neuroscience*, 107(1–2), 43–61. <https://doi.org/10.3109/00207450109149756>
- 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 and 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>
- Ceponiene, R., Cheour, M., & Näätänen, R. (1998). Interstimulus interval and auditory event-related potentials in children: Evidence for multiple generators. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 108(4), 345–354. [https://doi.org/10.1016/s0168-5597\(97\)00081-6](https://doi.org/10.1016/s0168-5597(97)00081-6)

- Ceponiene, R., Lepistö, T., Soininen, M., Aronen, E., Alku, P., & Näätänen, R. (2004). Event-related potentials associated with sound discrimination versus novelty detection in children. *Psychophysiology*, 41(1), 130–141. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2003.00138.x>
- Chan, M. Y., Na, J., Agres, P. F., Savalia, N. K., Park, D. C., & Wig, G. S. (2018). Socioeconomic status moderates age-related differences in the brain's functional network organization and anatomy across the adult lifespan. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(22), E5144–E5153. <https://doi.org/10.1073/pnas.1714021115>
- Chang, C., Leopold, D. A., Schölvinck, M. L., Mandelkow, H., Picchioni, D., Liu, X., Ye, F. Q., Turchi, J. N., & Duyn, J. H. (2016). Tracking brain arousal fluctuations with fMRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(16), 4518–4523. <https://doi.org/10.1073/pnas.1520613113>
- Checa, P., Castellanos, M. C., Abundis-Gutiérrez, A., & Rosario Rueda, M. (2014). Development of neural mechanisms of conflict and error processing during childhood: Implications for self-regulation. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00326>
- 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>
- Clayton, M. S., Yeung, N., & Cohen Kadosh, R. (2015). The roles of cortical oscillations in sustained attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(4), 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.004>
- Clearfield, M. W., & Jedd, K. E. (2013). The Effects of Socio-Economic Status on Infant Attention. *Infant and Child Development*, 22(1), 53–67. <https://doi.org/10.1002/icd.1770>
- Coch, D., Sanders, L. D., & Neville, H. J. (2005). An event-related potential study of selective auditory attention in children and adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(4), 605–622. <https://doi.org/10.1162/0898929053467631>
- Colombo, J. (2001). The development of visual attention in infancy. *Annual Review of Psychology*, 52, 337–367. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.337>
- Conners, C. K. (2001). *Conners' Kiddie Continuous Performance Test (K-CPT)*. North Tonawanda: Multi-Health Systems, Inc.
- Conners, C. K., & Sitarenios, G. (2011). *Conners' Continuous Performance Test (CPT)*. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (pp. 681–683). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3\\_1535](https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3_1535)
- Conners' Continuous Performance Test 3rd Edition (Conners CPT 3) | Pearson Assessment. (n.d.). Retrieved September 12, 2020, from <https://www.pearsonclinical.co.uk/Psychology/ChildMentalHealth/ChildADDADHDBehaviour/conners-cpt3/conners-continuous-performance-test-third-edition.aspx>



- Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: From environment to theory of mind. *Neuron*, 58(3), 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.04.017>
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews. Neuroscience*, 3(3), 201–215. <https://doi.org/10.1038/nrn755>
- Corteen, R. S., & Wood, B. (1972). Autonomic responses to shock-associated words in an unattended channel. *Journal of Experimental Psychology*, 94(3), 308–313. <https://doi.org/10.1037/h0032759>
- Courchesne, E., Hillyard, S. A., & Galambos, R. (1975). Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 39(2), 131–143. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(75\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(75)90003-6)
- Courchesne, E. (1978). Neurophysiological correlates of cognitive development: Changes in long-latency event-related potentials from childhood to adulthood. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 45(4), 468–482. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(78\)90291-2](https://doi.org/10.1016/0013-4694(78)90291-2)
- Courchesne, E., Ganz, L., & Norcia, A. M. (1981). Event-related brain potentials to human faces in infants. *Child Development*, 52(3), 804–811. <https://doi.org/10.2307/1129080>
- Cowart, C. (1987). Test Review: Reynolds, C. R., & Richmond, B. O. (1985) Revised Children's Manifest Anxiety Scales (RCMAS). Los Angeles: Western Psychological Services. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 5(1), 77–80. <https://doi.org/10.1177/073428298700500110>
- Croft, R. J., Lee, A., Bertolot, J., & Gruzelier, J. H. (2001). Associations of P50 suppression and desensitization with perceptual and cognitive features of “unreality” in schizotypy. *Biological Psychiatry*, 50(6), 441–446. [https://doi.org/10.1016/s0006-3223\(01\)01082-4](https://doi.org/10.1016/s0006-3223(01)01082-4)
- Cronbach, L. J., & Meehl, P. E. (1955). Construct validity in psychological tests. *Psychological Bulletin*, 52(4), 281–302. <https://doi.org/10.1037/h0040957>
- Crone, E. A., & Ridderinkhof, K. R. (2011). The developing brain: From theory to neuroimaging and back. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(2), 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2010.12.001>
- Crowley, K. E., & Colrain, I. M. (2004). A review of the evidence for P2 being an independent component process: Age, sleep and modality. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 115(4), 732–744. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2003.11.021>
- Cudo, A., Francuz, P., Augustynowicz, P., & Stróżak, P. (2018). The Effects of Arousal and Approach Motivated Positive Affect on Cognitive Control. An ERP Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00320>
- Cullum, C. M., Harris, J. G., Waldo, M. C., Smernoff, E., Madison, A., Nagamoto, H. T., Griffith, J., Adler, L. E., & Freedman, R. (1993). Neurophysiological and

neuropsychological evidence for attentional dysfunction in schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 10(2), 131–141. [https://doi.org/10.1016/0920-9964\(93\)90048-n](https://doi.org/10.1016/0920-9964(93)90048-n)

- Curatolo, P., D'Agati, E., & Moavero, R. (2010). The neurobiological basis of ADHD. *Italian Journal of Pediatrics*, 36(1), 79. <https://doi.org/10.1186/1824-7288-36-79>
- Cycowicz, Y. M., Friedman, D., Rothstein, M., & Snodgrass, J. G. (1997). Picture naming by young children: Norms for name agreement, familiarity, and visual complexity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 65(2), 171–237. <https://doi.org/10.1006/jecp.1996.2356>
- Cycowicz, Yael M., & Friedman, D. (1998). Effect of sound familiarity on the event-related potentials elicited by novel environmental sounds. *Brain and Cognition*, 36(1), 30–51. <https://doi.org/10.1006/brcg.1997.0955>
- Cycowicz, Yael M., Friedman, D., & Rothstein, M. (1996). An ERP developmental study of repetition priming by auditory novel stimuli. *Psychophysiology*, 33(6), 680–690. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1996.tb02364.x>
- D'Angiulli, A., Herdman, A., Stapells, D., & Hertzman, C. (2008). Children's event-related potentials of auditory selective attention vary with their socioeconomic status. *Neuropsychology*, 22(3), 293–300. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.22.3.293>
- Davies, P. L., Chang, W.-P., & Gavin, W. J. (2009a). Maturation of sensory gating performance in children with and without sensory processing disorders. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 72(2), 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.12.007>
- Davies, P. L., Chang, W.-P., & Gavin, W. J. (2009b). Maturation of sensory gating performance in children with and without sensory processing disorders. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 72(2), 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.12.007>
- Delay, J., & Pichot, P. (1949). II. - La contribution de la méthode des tests mentaux à la recherche psycho-pathologique. *L'Année psychologique*, 50(1), 647–653. <https://doi.org/10.3406/psy.1949.8482>
- Description complète de l'oreille. (n.d.). Alyn Simard AUDIOPROTHÉSISTES. Retrieved October 3, 2020, from <https://alynsimardaudio.com/documentation/description-complete-loreille/>
- Desmedt, J., Debecker, J., & Manil, J. (1965). Demonstration of a cerebral electric sign associated with the detection by the subject of a tactile sensorial stimulus. The analysis of cerebral evoked potentials derived from the scalp with the aid of numerical ordinates. *Bulletin de l'Academie Royale de Medecine de Belgique*, 5(11), 887.
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 70(1), 80–90. <https://doi.org/10.1037/h0039515>

- Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5TM, 5th ed. (2013). American Psychiatric Publishing, Inc. <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Dimoska, A., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2006). The auditory-evoked N2 and P3 components in the stop-signal task: Indices of inhibition, response-conflict or error-detection? *Brain and Cognition*, 62(2), 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.03.011>
- Dinteren, R. van, Arns, M., Jongsma, M. L. A., & Kessels, R. P. C. (2014). P300 Development across the Lifespan: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS ONE*, 9(2), e87347. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087347>
- Doebel, S., Barker, J. E., Chevalier, N., Michaelson, L. E., Fisher, A. V., & Munakata, Y. (2017). Getting ready to use control: Advances in the measurement of young children's use of proactive control. *PLoS ONE*, 12(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175072>
- Dolu, N., Altınkaynak, M., Güven, A., Özmen, S., Demirci, E., İzzetoğlu, M., & Pektaş, F. (2019). Effects of methylphenidate treatment in children with ADHD: A multimodal EEG/fNIRS approach. *Psychiatry and Clinical Psychopharmacology*, 29(3), 285–292. <https://doi.org/10.1080/24750573.2018.1542779>
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96(3), 433–458. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.3.433>
- Duncan, M. J., Smith, M., Bryant, E., Eyre, E., Cook, K., Hankey, J., Tallis, J., Clarke, N., & Jones, M. V. (2016). Effects of increasing and decreasing physiological arousal on anticipation timing performance during competition and practice. *European Journal of Sport Science*, 16(1), 27–35. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.979248>
- Duncan-Johnson, C. C., & Donchin, E. (1977). On quantifying surprise: The variation of event-related potentials with subjective probability. *Psychophysiology*, 14(5), 456–467. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1977.tb01312.x>
- DuPaul, G. J., Power, T. J., Anastopoulos, A. D., & Reid, R. (1998). *ADHD Rating Scale—IV: Checklists, norms, and clinical interpretation*. Guilford Press.
- Durston, S., Thomas, K. M., Yang, Y., Uluğ, A. M., Zimmerman, R. D., & Casey, B. J. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5(4), F9–F16. <https://doi.org/10.1111/1467-7687.00235>
- Eason, R. G., Harter, M. R., & White, C. T. (1969). Effects of attention and arousal on visually evoked cortical potentials and reaction time in man. *Physiology & Behavior*, 4(3), 283–289. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(69\)90176-0](https://doi.org/10.1016/0031-9384(69)90176-0)
- Edgar, J. C., Huang, M. X., Weisend, M. P., Sherwood, A., Miller, G. A., Adler, L. E., & Cañive, J. M. (2003). Interpreting abnormality: An EEG and MEG study of P50 and the auditory

paired-stimulus paradigm. *Biological Psychology*, 65(1), 1–20.  
[https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(03\)00094-2](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(03)00094-2)

- Edgar, J. C., Murray, R., Kuschner, E. S., Pratt, K., Paulson, D. N., Dell, J., Golembki, R., Lam, P., Bloy, L., Gaetz, W., & Roberts, T. P. L. (2015). The maturation of auditory responses in infants and young children: A cross-sectional study from 6 to 59 months. *Frontiers in Neuroanatomy*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnana.2015.00131>
- Edmonds, H. L., Gordon, E. K., & Levy, W. J. (2018). Chapter 12—Central Nervous System Monitoring. In J. A. Kaplan (Ed.), *Kaplan's Essentials of Cardiac Anesthesia* (Second Edition) (pp. 277–298). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49798-5.00012-7>
- Eggermont, J. J., Ponton, C. W., Don, M., Waring, M. D., & Kwong, B. (1997). Maturation Delays in Cortical Evoked Potentials in Cochlear Implant Users. *Acta Oto-Laryngologica*, 117(2), 161–163. <https://doi.org/10.3109/00016489709117760>
- ElShafei, H. A., Bouet, R., Bertrand, O., & Bidet-Caulet, A. (2018). Two Sides of the Same Coin: Distinct Sub-Bands in the  $\alpha$  Rhythm Reflect Facilitation and Suppression Mechanisms during Auditory Anticipatory Attention. *ENeuro*, 5(4). <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0141-18.2018>
- ElShafei, H. A., Fornoni, L., Bertrand, O., & Bidet-Caulet, A. (2018). Not Just A Number: Age-Related Modulations of Oscillatory Patterns Underlying Top-Down and Bottom-Up Attention. *BioRxiv*, 496117. <https://doi.org/10.1101/496117>
- ElShafei, H. A., Fornoni, L., Masson, R., Bertrand, O., & Bidet-Caulet, A. (2019). What's in Your Gamma? Activation of the Ventral Fronto-Parietal Attentional Network in Response to Distracting Sounds. *Cerebral Cortex* (New York, N.Y.: 1991). <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz119>
- Elshafei, H., Fornoni, L., Masson, R., Bertrand, O., & Bidet-Caulet, A. (2020). Related Modulations of Alpha and Gamma Brain Activities Underlying Anticipation and Distraction. *PlosOne*, In Press.
- Epstein, J. N., Langberg, J. M., Rosen, P. J., Graham, A., Narad, M. E., Antonini, T. N., Brinkman, W. B., Froehlich, T., Simon, J. O., & Altaye, M. (2011). Evidence for higher reaction time variability for children with ADHD on a range of cognitive tasks including reward and event rate manipulations. *Neuropsychology*, 25(4), 427–441. <https://doi.org/10.1037/a0022155>
- Escera, C., Alho, K., Schröger, E., & Winkler, I. (2000). Involuntary attention and distractibility as evaluated with event-related brain potentials. *Audiology & Neuro-Otology*, 5(3–4), 151–166. <https://doi.org/13877>
- Escera, C., Alho, K., Winkler, I., & Näätänen, R. (1998). Neural mechanisms of involuntary attention to acoustic novelty and change. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(5), 590–604. <https://doi.org/10.1162/089892998562997>
- Escera, C., Yago, E., Polo, M. D., & Grau, C. (2000). The individual replicability of mismatch negativity at short and long inter-stimulus intervals. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 111(3), 546–551.

- Escera, C., Alho, K., Schröger, E., & Winkler, I. W. (2000). Involuntary attention and distractibility as evaluated with event-related brain potentials. *Audiology & Neuro-Otology*, 5(3–4), 151–166. <https://doi.org/10.1159/000013877>
- Escera, C., & Corral, M. J. (2007). Role of mismatch negativity and novelty-P3 in involuntary auditory attention. *Journal of Psychophysiology*, 21, 251–264. <https://doi.org/10.1027/0269-8803.21.34.251>
- Escera, C., Yago, E., & Alho, K. (2001). Electrical responses reveal the temporal dynamics of brain events during involuntary attention switching. *European Journal of Neuroscience*, 14(5), 877–883. <https://doi.org/10.1046/j.0953-816x.2001.01707.x>
- Escera, Carles, Yago, E., Corral, M.-J., Corbera, S., & Nunez, M. I. (2003). Attention capture by auditory significant stimuli: Semantic analysis follows attention switching. *European Journal of Neuroscience*, 18(8), 2408–2412. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2003.02937.x>
- Esterman, M., & Rothlein, D. (2019). Models of sustained attention. *Current Opinion in Psychology*, 29, 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.03.005>
- Eysenck, H. J., & Eysenck, M. W. (1985). *Personality and individual differences: A Natural Science Approach* (New York: Plenum).
- Eysenck, M. (1982). *Attention and Arousal: Cognition and Performance*. Springer-Verlag. <https://www.springer.com/gp/book/9783642683923>
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Hohnsbein, J., & Kleinsorge, T. (2003). Short-term mobilization of processing resources is revealed in the event-related potential. *Psychophysiology*, 40(6), 914–923. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00109>
- Fan, J., Xu, P., Van Dam, N. T., Eilam-Stock, T., Gu, X., Luo, Y., & Hof, P. R. (2012). Spontaneous Brain Activity Relates to Autonomic Arousal. *The Journal of Neuroscience*, 32(33), 11176–11186. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1172-12.2012>
- Farah, M. J. (2017). The Neuroscience of Socioeconomic Status: Correlates, Causes, and Consequences. *Neuron*, 96(1), 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.08.034>
- Farah, M. J., Shera, D. M., Savage, J. H., Betancourt, L., Giannetta, J. M., Brodsky, N. L., Malmud, E. K., & Hurt, H. (2006). Childhood poverty: Specific associations with neurocognitive development. *Brain Research*, 1110(1), 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.06.072>
- Faraone, S. V., Biederman, J., & Mick, E. (2006). The age-dependent decline of attention deficit hyperactivity disorder: A meta-analysis of follow-up studies. *Psychological Medicine*, 36(2), 159–165. <https://doi.org/10.1017/S003329170500471X>
- Farrant, K., & Uddin, L. Q. (2015). Asymmetric development of dorsal and ventral attention networks in the human brain. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 12, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.02.001>

- Fiebelkorn, I. C., Pinsk, M. A., & Kastner, S. (2019). The mediodorsal pulvinar coordinates the macaque fronto-parietal network during rhythmic spatial attention. *Nature Communications*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08151-4>
- Finley, W. W., Faux, S. F., Hutcheson, J., & Amstutz, L. (1985). Long-latency event-related potentials in the evaluation of cognitive function in children. *Neurology*, 35(3), 323–327. <https://doi.org/10.1212/wnl.35.3.323>
- Fitzroy, A. B., Krizman, J., Tierney, A., Agouridou, M., & Kraus, N. (2015). Longitudinal maturation of auditory cortical function during adolescence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00530>
- Flehmig, H. C., Steinborn, M., Langner, R., Scholz, A., & Westhoff, K. (2007). Assessing intraindividual variability in sustained attention: Reliability, relation to speed and accuracy, and practice effects. *Psychology Science*, 18(2), 132–149.
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review. *Psychophysiology*, 45(1), 152–170. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00602.x>
- Fouillen, M. (2015). Interface Cerveau-Machine de type P300 pour l'entraînement de l'attention chez les enfants avec TDA/H [These en préparation, Lyon]. <http://www.theses.fr/s141785>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2018). *An R Companion to Applied Regression*. SAGE Publications.
- Fox, M. D., Corbetta, M., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., & Raichle, M. E. (2006). Spontaneous neuronal activity distinguishes human dorsal and ventral attention systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(26), 10046–10051. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604187103>
- Freedman, R., Adler, L. E., Myles-Worsley, M., Nagamoto, H. T., Miller, C., Kisley, M., McRae, K., Cawthra, E., & Waldo, M. (1996). Inhibitory gating of an evoked response to repeated auditory stimuli in schizophrenic and normal subjects. Human recordings, computer simulation, and an animal model. *Archives of General Psychiatry*, 53(12), 1114–1121. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.1996.01830120052009>
- Freedman, R., Adler, L. E., & Waldo, M. (1987). Gating of the Auditory Evoked Potential in Children and Adults. *Psychophysiology*, 24(2), 223–227. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1987.tb00282.x>
- Friedman, D., Cycowicz, Y. M., & Gaeta, H. (2001). The novelty P3: An event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 25(4), 355–373. [https://doi.org/10.1016/s0149-7634\(01\)00019-7](https://doi.org/10.1016/s0149-7634(01)00019-7)
- Friedman-Hill, S. R., Wagman, M. R., Gex, S. E., Pine, D. S., Leibenluft, E., & Ungerleider, L. G. (2010). What does distractibility in ADHD reveal about mechanisms for top-down attentional control? *Cognition*, 115(1), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.11.013>

- Fuchigami, T., Okubo, O., Fujita, Y., Okuni, M., Noguchi, Y., & Yamada, T. (1993). Auditory event-related potentials and reaction time in children: Evaluation of cognitive development. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 35(3), 230–237. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1993.tb11627.x>
- Fuster, J. M. (2000). Executive frontal functions. *Experimental Brain Research*, 133(1), 66–70. <https://doi.org/10.1007/s002210000401>
- Fuster, J. M. (2002). Frontal lobe and cognitive development. *Journal of Neurocytology*, 31(3–5), 373–385.
- Fuster, J. M. (2017). Chapter 1—Prefrontal Executive Functions Predict and Preadapt. In E. Goldberg (Ed.), *Executive Functions in Health and Disease* (pp. 3–19). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803676-1.00001-5>
- Gaspar, J. M., & McDonald, J. J. (2014). Suppression of salient objects prevents distraction in visual search. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 34(16), 5658–5666. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4161-13.2014>
- Geng, J. J., & DiQuattro, N. E. (2010). Attentional capture by a perceptually salient non-target facilitates target processing through inhibition and rapid rejection. *Journal of Vision*, 10(6). <https://doi.org/10.1167/10.6.5>
- Geva, R., Zivan, M., Warsha, A., & Olchik, D. (2013). Alerting, orienting or executive attention networks: Differential patterns of pupil dilations. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2013.00145>
- Giard, M. H., Fort, A., Mouchetant-Rostaing, Y., & Pernier, J. (2000). Neurophysiological mechanisms of auditory selective attention in humans. *Frontiers in Bioscience: A Journal and Virtual Library*, 5, D84–94. <https://doi.org/10.2741/giard>
- Giard, M. H., Perrin, F., Echallier, J. F., Thévenet, M., Froment, J. C., & Pernier, J. (1994). Dissociation of temporal and frontal components in the human auditory N1 wave: A scalp current density and dipole model analysis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 92(3), 238–252. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(94\)90067-1](https://doi.org/10.1016/0168-5597(94)90067-1)
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C., & 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>
- Gitelman, D. R. (2003). Attention and its disorders Imaging in clinical neuroscience. *British Medical Bulletin*, 65(1), 21–34. <https://doi.org/10.1093/bmb/65.1.21>
- Giuliano, R. J., Karns, C. M., Neville, H. J., & Hillyard, S. A. (2014). Early auditory evoked potential is modulated by selective attention and related to individual differences in visual working memory capacity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(12), 2682–2690. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00684](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00684)

- Giuliano, R. J., Karns, C. M., Roos, L. E., Bell, T. A., Petersen, S., Skowron, E. A., Neville, H. J., & Pakulak, E. (2018). Effects of early adversity on neural mechanisms of distractor suppression are mediated by sympathetic nervous system activity in preschool-aged children. *Developmental Psychology*, 54(9), 1674–1686. <https://doi.org/10.1037/dev0000499>
- Glucksberg, S., & Cowen, G. N. (1970). Memory for nonattended auditory material. *Cognitive Psychology*, 1(2), 149–156. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(70\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0010-0285(70)90010-1)
- Godey, B., Schwartz, D., de Graaf, J. B., Chauvel, P., & Liégeois-Chauvel, C. (2001). Neuromagnetic source localization of auditory evoked fields and intracerebral evoked potentials: A comparison of data in the same patients. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 112(10), 1850–1859. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(01\)00636-8](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(01)00636-8)
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., & Thompson, P. M. (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. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Goller, A. I., Otten, L. J., & Ward, J. (2009). Seeing sounds and hearing colors: An event-related potential study of auditory-visual synesthesia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(10), 1869–1881. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21134>
- Golob, E. J., Pratt, H., & Starr, A. (2002a). Preparatory slow potentials and event-related potentials in an auditory cued attention task. *Clinical Neurophysiology*, 113(10), 1544–57. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00220-1](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00220-1)
- Gómez, C. M., Fernández, A., Maestú, F., Amo, C., González-Rosa, J. J., Vaquero, E., & Ortiz, T. (2004). Task-specific sensory and motor preparatory activation revealed by contingent magnetic variation. *Cognitive Brain Research*, 21(1), 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.05.005>
- Gómez, C. M., Flores, A., & Ledesma, A. (2007). Fronto-parietal networks activation during the contingent negative variation period. *Brain Research Bulletin*, 73(1), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2007.01.015>
- Goodin, D. S., Squires, K. C., Henderson, B. H., & Starr, A. (1978). An Early Event-Related Cortical Potential. *Psychophysiology*, 15(4), 360–365. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1978.tb01392.x>
- Graziano, P. A., Calkins, S. D., & Keane, S. P. (2011). Sustained Attention Development during the Toddlerhood to Preschool Period: Associations with Toddlers' Emotion Regulation Strategies and Maternal Behavior. *Infant and Child Development*, 20(6), 389–408. <https://doi.org/10.1002/icd.731>
- Gumenyuk, V., Korzyukov, O., Escera, C., Hämäläinen, M., Huotilainen, M., Häyrynen, T., Oksanen, H., Näätänen, R., von Wendt, L., & Alho, K. (2005). Electrophysiological



- evidence of enhanced distractibility in ADHD children. *Neuroscience Letters*, 374(3), 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.10.081>
- Gumenyuk, V., Korzyukov, O., Alho, K., Escera, C., & Naatanen, R. (2004). Effects of auditory distraction on electrophysiological brain activity and performance in children aged 8-13 years. *Psychophysiology*, 41(1), 30–36. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00123>
- Gumenyuk, V., Korzyukov, O., Alho, K., Escera, C., Schröger, E., Ilmoniemi, R. J., & Näätänen, R. (2001). Brain activity index of distractibility in normal school-age children. *Neuroscience Letters*, 314(3), 147–150. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)02308-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)02308-4)
- Gur, R. C., & Gur, R. E. (2017). Complementarity of sex differences in brain and behavior: From laterality to multimodal neuroimaging. *Journal of Neuroscience Research*, 95(1–2), 189–199. <https://doi.org/10.1002/jnr.23830>
- Håden, g. p., stefanics, g., vestergaard, m. d., denham, s. l., sziller, i., & winkler, i. (2009). Timbre-independent extraction of pitch in newborn infants. *Psychophysiology*, 46(1), 69–74. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00749.x>
- Halperin, J. M., McKay, K. E., Matier, K., & Sharma, V. (1994). Attention, Response Inhibition, and Activity Level in Children: Developmental Neuropsychological Perspectives. In M. G. Tramontana & S. R. Hooper (Eds.), *Advances in Child Neuropsychology* (pp. 1–54). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2608-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2608-6_1)
- Hampton Wray, A., Stevens, C., Pakulak, E., Isbell, E., Bell, T., & Neville, H. (2017). Development of selective attention in preschool-age children from lower socioeconomic status backgrounds. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 26, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.06.006>
- Hari, R., Pelizzone, M., Mäkelä, J. P., Hällström, J., Leinonen, L., & Lounasmaa, O. V. (1987). Neuromagnetic responses of the human auditory cortex to on- and offsets of noise bursts. *Audiology: Official Organ of the International Society of Audiology*, 26(1), 31–43. <https://doi.org/10.3109/00206098709078405>
- Harpin, V. A. (2005). The effect of ADHD on the life of an individual, their family, and community from preschool to adult life. *Archives of Disease in Childhood*, 90(suppl 1), i2–i7. <https://doi.org/10.1136/adc.2004.059006>
- Helfrich, R. F., Fiebelkorn, I. C., Szczepanski, S. M., Lin, J. J., Parvizi, J., Knight, R. T., & Kastner, S. (2018). Neural Mechanisms of Sustained Attention Are Rhythmic. *Neuron*, 99(4), 854–865.e5. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.07.032>
- Hernes, K. G., Mørkrid, L., Fremming, A., Ødegården, S., Martinsen, Ø. G., & Storm, H. (2002). Skin conductance changes during the first year of life in full-term infants. *Pediatric Research*, 52(6), 837–843. <https://doi.org/10.1203/00006450-200212000-00005>
- Hillyard, S. (1973). The CNV and human behavior: A review. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 33, 161–171.

- Hillyard, S. A., Hink, R. F., Schwent, V. L., & Picton, T. W. (1973a). Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science (New York, N.Y.)*, 182(4108), 177–180. <https://doi.org/10.1126/science.182.4108.177>
- Hillyard, Steven A., Mangun, G. R., Woldorff, M. G., & Luck, S. J. (1995). Neural systems mediating selective attention. In *The cognitive neurosciences* (pp. 665–681). The MIT Press.
- Hink, R. F., & Hillyard, S. A. (1976). Auditory evoked potentials during selective listening to dichotic speech messages. *Perception & Psychophysics*, 20(4), 236–242. <https://doi.org/10.3758/BF03199449>
- Hölig, C., & Berti, S. (2010). To switch or not to switch: Brain potential indices of attentional control after task-relevant and task-irrelevant changes of stimulus features. *Brain Research*, 1345, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.05.047>
- Horváth, J., Czigler, I., Birkás, E., Winkler, I., & Gervai, J. (2009). Age-related differences in distraction and reorientation in an auditory task. *Neurobiology of Aging*, 30(7), 1157–1172. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2007.10.003>
- Horváth, J., Maess, B., Berti, S., & Schröger, E. (2008a). Primary motor area contribution to attentional reorienting after distraction. *Neuroreport*, 19(4), 443–446.
- Horváth, J., Sussman, E., Winkler, I., & Schröger, E. (2011). Preventing distraction: Assessing stimulus-specific and general effects of the predictive cueing of deviant auditory events. *Biological Psychology*, 87(1), 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.01.011>
- Horváth, J., Winkler, I., & Bendixen, A. (2008b). Do N1/MMN, P3a, and RON form a strongly coupled chain reflecting the three stages of auditory distraction? *Biological Psychology*, 79, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2008.04.001>
- Horváth, J., Winkler, I., & Bendixen, A. (2008b). Do N1/MMN, P3a, and RON form a strongly coupled chain reflecting the three stages of auditory distraction? *Biological Psychology*, 79(2), 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2008.04.001>
- Hostinar, C. E., Ross, K. M., Chen, E., & Miller, G. E. (2015). Modeling the association between lifecourse socioeconomic disadvantage and systemic inflammation in healthy adults: The role of self-control. *Health Psychology*, 34(6), 580–590. <https://doi.org/10.1037/hea0000130>
- Houston, R. J., & Stanford, M. S. (2001). Mid-latency evoked potentials in self-reported impulsive aggression. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 40(1), 1–15.
- Howard, S. J., Johnson, J., & Pascual-Leone, J. (2014). Clarifying inhibitory control: Diversity and development of attentional inhibition. *Cognitive Development*, 31, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2014.03.001>
- Howells, F. M., Stein, D. J., & Russell, V. A. (2012). Synergistic tonic and phasic activity of the locus coeruleus norepinephrine (LC-NE) arousal system is required for optimal

- attentional performance. *Metabolic Brain Disease*, 27(3), 267–274. <https://doi.org/10.1007/s11011-012-9287-9>
- Hoyer, R. S., Elshafei, H., Hemmerlin, J., Bouet, R., & Bidet-Caulet, A. (2019). Why are children so distractible? Development of attentional capacities and phasic arousal from childhood to adulthood. *BioRxiv*, 747527. <https://doi.org/10.1101/747527>
- Hrabok, M., Kerns, K. A., & Müller, U. (2007). The vigilance, orienting, and executive attention networks in 4-year-old children. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 13(5), 408–421. <https://doi.org/10.1080/13825580600977224>
- Huang, N., & Elhilali, M. (2017). Auditory salience using natural soundscapes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3), 2163–2176. <https://doi.org/10.1121/1.4979055>
- Huang-Pollock, C. L., Nigg, J. T., & Carr, T. H. (2005). Deficient attention is hard to find: Applying the perceptual load model of selective attention to attention deficit hyperactivity disorder subtypes. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 46(11), 1211–1218. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2005.00410.x>
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *The Journal of Physiology*, 148(3), 574–591.
- Hultin, L., Rossini, P., Romani, G. L., Högstedt, P., Tecchio, F., & Pizzella, V. (1996). Neuromagnetic localization of the late component of the contingent negative variation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 98(6), 435–448. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(96\)95507-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(96)95507-8)
- Huotilainen, M., Winkler, I., Alho, K., Escera, C., Virtanen, J., Ilmoniemi, R. J., Jääskeläinen, I. P., Pekkonen, E., & Näätänen, R. (1998). Combined mapping of human auditory EEG and MEG responses. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 108(4), 370–379. [https://doi.org/10.1016/S0168-5597\(98\)00017-3](https://doi.org/10.1016/S0168-5597(98)00017-3)
- Huttenlocher, P. R., & Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, 387(2), 167–178. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9861\(19971020\)387:2<167::aid-cne1>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9861(19971020)387:2<167::aid-cne1>3.0.co;2-z)
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., & Schlaug, G. (2009). The effects of musical training on structural brain development: A longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 182–186. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04852.x>
- Ignashchenkova, A., Dicke, P. W., Haarmeier, T., & Thier, P. (2004). Neuron-specific contribution of the superior colliculus to overt and covert shifts of attention. *Nature Neuroscience*, 7(1), 56–64. <https://doi.org/10.1038/nn1169>
- Jain, A., Bansal, R., Kumar, A., & Singh, K. (2015). A comparative study of visual and auditory reaction times on the basis of gender and physical activity levels of medical first year students. *International Journal of Applied and Basic Medical Research*, 5(2), 124–127. <https://doi.org/10.4103/2229-516X.157168>

- Jamkhande, P. G., & Khawaja, A. (2016). Role of norepinephrine reuptake inhibitors in attention deficit hyperactivity disorder: A mechanism-based short review. *International Journal of Nutrition, Pharmacology, Neurological Diseases*, 6(4), 146. <https://doi.org/10.4103/2231-0738.191660>
- Janelle, C. M. (2002). Anxiety, arousal and visual attention: A mechanistic account of performance variability. *Journal of Sports Sciences*, 20(3), 237–251. <https://doi.org/10.1080/026404102317284790>
- Janssen, K. C., Phillipson, S., O'Connor, J., & Johns, M. W. (2017). Validation of the Epworth Sleepiness Scale for Children and Adolescents using Rasch analysis. *Sleep Medicine*, 33, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2017.01.014>
- Janssen, T. W. P., Geladé, K., van Mourik, R., Maras, A., & Oosterlaan, J. (2016). An ERP source imaging study of the oddball task in children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder. *Clinical Neurophysiology*, 127(2), 1351–1357. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.10.051>
- Jerger, K., Biggins, C., & Fein, G. (1992). P50 suppression is not affected by attentional manipulations. *Biological Psychiatry*, 31(4), 365–377. [https://doi.org/10.1016/0006-3223\(92\)90230-w](https://doi.org/10.1016/0006-3223(92)90230-w)
- Johnson, M. H., Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1991). Components of visual orienting in early infancy: Contingency learning, anticipatory looking, and disengaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3(4), 335–344. <https://doi.org/10.1162/jocn.1991.3.4.335>
- Johnson, Mark H. (2001). Functional brain development in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(7), 475–483. <https://doi.org/10.1038/35081509>
- Johnson, R. (1993). On the neural generators of the P300 component of the event-related potential. *Psychophysiology*, 30(1), 90–97. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1993.tb03208.x>
- Johnstone, S. J., Barry, R. J., Anderson, J. W., & Coyle, S. F. (1996). Age-related changes in child and adolescent event-related potential component morphology, amplitude and latency to standard and target stimuli in an auditory oddball task. *International Journal of Psychophysiology*, 24(3), 223–238. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(96\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(96)00065-7)
- Jonkman, L. M., Kemner, C., Verbaten, M. N., Koelega, H. S., Camfferman, G., vd Gaag, R. J., Buitelaar, J. K., & van Engeland, H. (1997). Event-related potentials and performance of attention-deficit hyperactivity disorder: Children and normal controls in auditory and visual selective attention tasks. *Biological Psychiatry*, 41(5), 595–611. [https://doi.org/10.1016/s0006-3223\(96\)00073-x](https://doi.org/10.1016/s0006-3223(96)00073-x)
- Jonkman, L. M., Lansbergen, M., & Stauder, J. E. A. (2003). Developmental differences in behavioral and event-related brain responses associated with response preparation and inhibition in a go/nogo task. *Psychophysiology*, 40(5), 752–761. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00075>

- Jonkman, L. M. (2006). The development of preparation, conflict monitoring and inhibition from early childhood to young adulthood: A Go/Nogo ERP study. *Brain Research*, 1097(1), 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.04.064>
- Justo-Guillén, E., Ricardo-Garcell, J., Rodríguez-Camacho, M., Rodríguez-Agudelo, Y., Lelo de Larrea-Mancera, E. S., & Solís-Vivanco, R. (2019). Auditory mismatch detection, distraction, and attentional reorientation (MMN-P3a-RON) in neurological and psychiatric disorders: A review. *International Journal of Psychophysiology*, 146, 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.09.010>
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.
- Kanaka, N., Matsuda, T., Tomimoto, Y., Noda, Y., Matsushima, E., Matsuura, M., & Kojima, T. (2008). Measurement of development of cognitive and attention functions in children using continuous performance test. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 62(2), 135–141. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1819.2008.01746.x>
- Karmiloff-Smith, A. (1998). Development itself is the key to understanding developmental disorders. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(10), 389–398. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(98\)01230-3](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(98)01230-3)
- Karns, C. M., Isbell, E., Giuliano, R. J., & Neville, H. J. (2015). Auditory attention in childhood and adolescence: An event-related potential study of spatial selective attention to one of two simultaneous stories. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 13, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.03.001>
- Kasper, R. W., Cecotti, H., Touryan, J., Eckstein, M. P., & Giesbrecht, B. (2014). Isolating the neural mechanisms of interference during continuous multisensory dual-task performance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(3), 476–489. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00480](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00480)
- Kayser, C., Petkov, C. I., Lippert, M., & Logothetis, N. K. (2005). Mechanisms for Allocating Auditory Attention: An Auditory Saliency Map. *Current Biology*, 15(21), 1943–1947. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.09.040>
- Keen, R. (2011). The development of problem solving in young children: A critical cognitive skill. *Annual Review of Psychology*, 62, 1–21. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.031809.130730>
- Keil, A., Gruber, T., Müller, M. M., Moratti, S., Stolarova, M., Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2003). Early modulation of visual perception by emotional arousal: Evidence from steady-state visual evoked brain potentials. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3(3), 195–206. <https://doi.org/10.3758/CABN.3.3.195>
- Kemner, C., Verbaten, M. N., Koelega, H. S., Buitelaar, J. K., van der Gaag, R. J., Camfferman, G., & van Engeland, H. (1996). Event-related brain potentials in children with attention-deficit and hyperactivity disorder: Effects of stimulus deviancy and task relevance in the visual and auditory modality. *Biological Psychiatry*, 40(6), 522–534. [https://doi.org/10.1016/0006-3223\(95\)00429-7](https://doi.org/10.1016/0006-3223(95)00429-7)

- Kenemans, J. L., Smulders, F. T. Y., & Kok, A. (1995). Selective processing of two-dimensional visual stimuli in young and old subjects: Electrophysiological analysis. *Psychophysiology*, 32(2), 108–120. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1995.tb03302.x>
- Kessler, R. C., Adler, L., Ames, M., Demler, O., Faraone, S., Hiripi, E., Howes, M. J., Jin, R., Secnik, K., Spencer, T., Ustun, T. B., & Walters, E. E. (2005). The World Health Organization Adult ADHD Self-Report Scale (ASRS): A short screening scale for use in the general population. *Psychological Medicine*, 35(2), 245–256.
- Kihara, M., Hogan, A. M., Newton, C. R., Garrashi, H. H., Neville, B. R., & de Haan, M. (2010). Auditory and visual novelty processing in normally-developing Kenyan children. *Clinical Neurophysiology*, 121(4), 564–576. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.11.086>
- Kishiyama, M. M., Boyce, W. T., Jimenez, A. M., Perry, L. M., & Knight, R. T. (2009). Socioeconomic disparities affect prefrontal function in children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(6), 1106–1115. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21101>
- Kisley, M. A., Polk, S. D., Ross, R. G., Levisohn, P. M., & Freedman, R. (2003). Early postnatal development of sensory gating. *Neuroreport*, 14(5), 693–697. <https://doi.org/10.1097/00001756-200304150-00007>
- Knight, R. T., Grabowecky, M. F., & Scabini, D. (1995). Role of human prefrontal cortex in attention control. *Advances in Neurology*, 66, 21–34; discussion 34-36.
- Koch, C., & Ullman, S. (1985). Shifts in selective visual attention: Towards the underlying neural circuitry. *Human Neurobiology*, 4(4), 219–227.
- Koechlin, E., & Summerfield, C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(6), 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.04.005>
- Kononowicz, T., & Penney, T. (2016). The contingent negative variation (CNV): Timing isn't everything. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.02.022>
- Korpilahti, P., & Lang, H. A. (1994). Auditory ERP components and mismatch negativity in dysphasic children. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 91(4), 256–264. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(94\)90189-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(94)90189-9)
- Korzyukov, O., Pflieger, M. E., Wagner, M., Bowyer, S. M., Rosburg, T., Sundaresan, K., Elger, C. E., & Boutros, N. N. (2007). Generators of the intracranial P50 response in auditory sensory gating. *NeuroImage*, 35(2), 814–826. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.12.011>
- Kratz, O., Studer, P., Baack, J., Malcherek, S., Erbe, K., Moll, G. H., & Heinrich, H. (2012). Differential effects of methylphenidate and atomoxetine on attentional processes in children with ADHD: An event-related potential study using the Attention Network Test. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry*, 37(1), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2011.12.008>

- Kratz, O., Studer, P., Malcherek, S., Erbe, K., Moll, G. H., & Heinrich, H. (2011). Attentional processes in children with ADHD: An event-related potential study using the attention network test. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 81(2), 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.05.008>
- Krauzlis, R. J., Lovejoy, L. P., & Zénon, A. (2013). Superior colliculus and visual spatial attention. *Annual Review of Neuroscience*, 36, 165–182. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062012-170249>
- Kurtzberg, D., Vaughan, H. G., & Kreuzer, J. A. (1979). Cognitive components in cerebral event-related potentials and selective attention. In *Task-related cortical potentials in children* (J. E. Desmedt).
- Kurtzberg, D., Vaughan, H. G., Kreuzer, J. A., & Fliegler, K. Z. (1995). Developmental studies and clinical application of mismatch negativity: Problems and prospects. *Ear and Hearing*, 16(1), 105–117. <https://doi.org/10.1097/00003446-199502000-00008>
- Kushnerenko, E., Ceponiene, R., Balan, P., Fellman, V., Huotilainen, M., & Näätänen, R. (2002). Maturation of the auditory event-related potentials during the first year of life. *NeuroReport*, 13(1), 47–51.
- Landau, A. N., & Fries, P. (2012). Attention samples stimuli rhythmically. *Current Biology: CB*, 22(11), 1000–1004. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.03.054>
- Lane, D. M., & Pearson, D. A. (1982). The development of selective attention. *Merrill-Palmer Quarterly*, 28(3), 317–337.
- Lansink, J. M., & Richards, J. E. (1997). Heart rate and behavioral measures of attention in six-, nine-, and twelve-month-old infants during object exploration. *Child Development*, 68(4), 610–620.
- Lawson, G. M., Duda, J. T., Avants, B. B., Wu, J., & Farah, M. J. (2013). Associations between Children's Socioeconomic Status and Prefrontal Cortical Thickness. *Developmental Science*, 16(5), 641–652. <https://doi.org/10.1111/desc.12096>
- Lecas, J.-C. (2004). Locus coeruleus activation shortens synaptic drive while decreasing spike latency and jitter in sensorimotor cortex. Implications for neuronal integration. *European Journal of Neuroscience*, 19(9), 2519–2530. <https://doi.org/10.1111/j.0953-816X.2004.03341.x>
- Lee, M. D., & Wagenmakers, E.-J. (2013). *Bayesian cognitive modeling: A practical course*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139087759>
- Leiva, A., Andrés, P., Servera, M., Verbruggen, F., & Parmentier, F. B. R. (2016). The role of age, working memory, and response inhibition in deviance distraction: A cross-sectional study. *Developmental Psychology*, 52(9), 1381–1393. <https://doi.org/10.1037/dev0000163>

- Lenartowicz, A., Simpson, G. V., & Cohen, M. S. (2013). Perspective: Causes and functional significance of temporal variations in attention control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 381. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00381>
- Levy, F. (1980). The development of sustained attention (vigilance) and inhibition in children: Some normative data. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 21(1), 77–84.
- Lewis, J. L. (1970). Semantic processing of unattended messages using dichotic listening. *Journal of Experimental Psychology*, 85(2), 225–228. <https://doi.org/10.1037/h0029518>
- Leynes, P. A., Allen, J. D., & Marsh, R. L. (1998). Topographic differences in CNV amplitude reflect different preparatory processes. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 31(1), 33–44. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(98\)00032-4](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(98)00032-4)
- Lezak, M. D. (1995). *Neuropsychological assessment*, 3rd ed (pp. xviii, 1026). Oxford University Press.
- Lin, C. C., Hsiao, C. K., & Chen, W. J. (1999). Development of sustained attention assessed using the continuous performance test among children 6-15 years of age. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 27(5), 403–412.
- Loiselle, D. L., Stamm, J. S., Maitinsky, S., & Whipple, S. C. (1980). Evoked potential and behavioral signs of attentive dysfunctions in hyperactive boys. *Psychophysiology*, 17(2), 193–201. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1980.tb00134.x>
- Looren de Jong, H., Kok, A., & van Rooy, J. C. (1988). Early and late selection in young and old adults: An event-related potential study. *Psychophysiology*, 25(6), 657–671. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1988.tb01904.x>
- Loveless, N. E., & Sanford, A. J. (1974). Slow potential correlates of preparatory set. *Biological Psychology*, 1(4), 303–314. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(74\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0301-0511(74)90005-2)
- Lucenet, J., & Blaye, A. (2014). Age-related changes in the temporal dynamics of executive control: A study in 5- and 6-year-old children. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00831>
- Lumsden, J., Howard, R. C., & Fenton, G. W. (1986). The contingent negative variation (CNV) to fear-related stimuli in acquisition and extinction. *International Journal of Psychophysiology*, 3(4), 253–261. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(86\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0167-8760(86)90034-6)
- Lundwall, R. A., Sgro, J. F., & Fanger, J. (2018). Response time scores on a reflexive attention task predict a child's inattention score from a parent report. *PLoS ONE*, 13(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190724>
- Määttä, S., Herrgård, E., Saavalainen, P., Pääkkönen, A., Könönen, M., Luoma, L., Laukkanen, E., Yppäriä, H., & Partanen, J. (2005). P3 amplitude and time-on-task effects in distractible adolescents. *Clinical Neurophysiology*, 116(9), 2175–2183. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.06.014>



- Mahajan, Y., & McArthur, G. (2012). Maturation of auditory event-related potentials across adolescence. *Hearing Research*, 294(1–2), 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2012.10.005>
- Mahone, E. M., Pillion, J. P., & Hiemenz, J. R. (2001). Initial development of an auditory continuous performance test for preschoolers. *Journal of Attention Disorders*, 5(2), 93–106. <https://doi.org/10.1177/108705470100500203>
- Mäki-Marttunen, V., Hagen, T., & Espeseth, T. (2019). Proactive and reactive modes of cognitive control can operate independently and simultaneously. *Acta Psychologica*, 199, 102891. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.102891>
- Mansouri, F. A., Egnér, T., & Buckley, M. J. (2017). Monitoring Demands for Executive Control: Shared Functions between Human and Nonhuman Primates. *Trends in Neurosciences*, 40(1), 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.11.001>
- Marini, F., Demeter, E., Roberts, K. C., Chelazzi, L., & Woldorff, M. G. (2016). Orchestrating Proactive and Reactive Mechanisms for Filtering Distracting Information: Brain-Behavior Relationships Revealed by a Mixed-Design fMRI Study. *The Journal of Neuroscience*, 36(3), 988–1000. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2966-15.2016>
- Mars, R. B., Debener, S., Gladwin, T. E., Harrison, L. M., Haggard, P., Rothwell, J. C., & Bestmann, S. (2008). Trial-by-Trial Fluctuations in the Event-Related Electroencephalogram Reflect Dynamic Changes in the Degree of Surprise. *Journal of Neuroscience*, 28(47), 12539–12545. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2925-08.2008>
- Marshall, P. J., Bar-Haim, Y., & Fox, N. A. (2004). The development of P50 suppression in the auditory event-related potential. *International Journal of Psychophysiology*, 51(2), 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2003.08.004>
- Masson, R., & Bidet-Caulet, A. (2019a). Fronto-central P3a to distracting sounds: An index of their arousing properties. *NeuroImage*, 185, 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.041>
- Masson, R., & Bidet-Caulet, A. (2019b). Fronto-central P3a to distracting sounds: An index of their arousing properties. *NeuroImage*, 185, 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.041>
- Matuschek, H., Kliegl, R., Vasishth, S., Baayen, H., & Bates, D. (2017). Balancing Type I error and power in linear mixed models. *Journal of Memory and Language*, 94, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2017.01.001>
- Max, C., Widmann, A., Kotz, S. A., Schröger, E., & Wetzels, N. (2015). Distraction by emotional sounds: Disentangling arousal benefits and orienting costs. *Emotion*, 15(4), 428–437. <https://doi.org/10.1037/a0039041>
- Mayes, S. D., & Calhoun, S. L. (2006). WISC-IV and WISC-III profiles in children with ADHD. *Journal of Attention Disorders*, 9(3), 486–493. <https://doi.org/10.1177/1087054705283616>

- McEwen, B. S., & Gianaros, P. J. (2010). Central role of the brain in stress and adaptation: Links to socioeconomic status, health, and disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1186, 190–222. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05331.x>
- McEwen, C. A., & McEwen, B. S. (2017). Social Structure, Adversity, Toxic Stress, and Intergenerational Poverty: An Early Childhood Model. *Annual Review of Sociology*, 43(1), 445–472. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-060116-053252>
- McGoey, K. E., DuPaul, G. J., Haley, E., & Shelton, T. L. (2007). Parent and Teacher Ratings of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder in Preschool: The ADHD Rating Scale-IV Preschool Version. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 29(4), 269–276. <https://doi.org/10.1007/s10862-007-9048-y>
- Mclsaac, H., & Polich, J. (1992). Comparison of infant and adult P300 from auditory stimuli. *Journal of Experimental Child Psychology*, 53(2), 115–128. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(92\)90044-7](https://doi.org/10.1016/0022-0965(92)90044-7)
- Mcleod, P. (1977). A dual task response modality effect: Support for multiprocessor models of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29(4), 651–667. <https://doi.org/10.1080/14640747708400639>
- McLoughlin, G., Asherson, P., Albrecht, B., Banaschewski, T., Rothenberger, A., Brandeis, D., & Kuntsi, J. (2011). Cognitive-electrophysiological indices of attentional and inhibitory processing in adults with ADHD: Familial effects. *Behavioral and Brain Functions: BBF*, 7, 26. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-7-26>
- Meade, E. R. (1981). Impulse Control and Cognitive Functioning in Lower and Middle-SES Children: A Developmental Study. *Merrill-Palmer Quarterly of Behavior and Development*, 27(3), 271–285. JSTOR.
- Merritt, P., Hirshman, E., Wharton, W., Devlin, J., Stangl, B., Bennett, S., & Hawkins, L. (2005). Gender differences in selective attention: Evidence from a spatial orienting task. *Journal of Vision*, 5(8), 1000–1000. <https://doi.org/10.1167/5.8.1000>
- Mezzacappa, E. (2004a). Alerting, Orienting, and Executive Attention: Developmental Properties and Sociodemographic Correlates in an Epidemiological Sample of Young, Urban Children. *Child Development*, 75(5), 1373–1386. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00746.x>
- Mezzacappa, E. (2004b). Alerting, orienting, and executive attention: Developmental properties and sociodemographic correlates in an epidemiological sample of young, urban children. *Child Development*, 75(5), 1373–1386. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00746.x>
- Mikkola, K., Wetzel, N., Leipala, J., Serenius-Sirve, S., Schroger, E., Huotilainen, M., & Fellman, V. (2010). Behavioral and evoked potential measures of distraction in 5-year-old children born preterm. WOS. <http://www.julkari.fi/handle/10024/109342>
- Moray, N. (1959). Attention in Dichotic Listening: Affective Cues and the Influence of Instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. <https://doi.org/10.1080/17470215908416289>

- Moriguchi, Y., & Hiraki, K. (2013). Prefrontal cortex and executive function in young children: A review of NIRS studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00867>
- Mortweet, S. L., & Christophersen, E. R. (2003). Behavior Problems in a Pediatric Context. In *Handbook of pediatric psychology*, 3rd ed (pp. 599–616). The Guilford Press.
- Munakata, Y., Snyder, H. R., & Chatham, C. H. (2012). Developing Cognitive Control: Three Key Transitions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(2), 71–77. <https://doi.org/10.1177/0963721412436807>
- Munka, L., & Berti, S. (2006). Examining task-dependencies of different attentional processes as reflected in the P3a and reorienting negativity components of the human event-related brain potential. *Neuroscience Letters*, 396(3), 177–181. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2005.11.035>
- Myles-Worsley, M., Coon, H., Byerley, W., Waldo, M., Young, D., & Freedman, R. (1996). Developmental and genetic influences on the P50 sensory gating phenotype. *Biological Psychiatry*, 39(4), 289–295. [https://doi.org/10.1016/0006-3223\(95\)00134-4](https://doi.org/10.1016/0006-3223(95)00134-4)
- Naatanen, R. (1970). The diminishing time-uncertainty with the lapse of time after the warning signal in reaction-time experiments with varying fore-periods. *Acta Psychologica*, Amsterdam, 34(4), 399–418. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(70\)90035-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(70)90035-1)
- Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42(4), 313–329. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(78\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(78)90006-9)
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 118(12), 2544–2590. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.026>
- Näätänen, R., & Picton, T. (1987a). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: A review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24(4), 375–425. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1987.tb00311.x>
- Näätänen, R., & Picton, T. (1987b). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: A review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24(4), 375–425. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1987.tb00311.x>
- Näätänen, Risto. (1972). Time uncertainty and occurrence uncertainty of the stimulus in a simple reaction time task. *Acta Psychologica*, 36(6), 492–503. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(72\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0001-6918(72)90029-7)
- Näätänen, Risto. (1992a). *Attention and brain function*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Näätänen, Risto. (1992b). *Attention and brain function* (494). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

- Nagai, Y., Critchley, H. D., Featherstone, E., Trimble, M. R., & Dolan, R. J. (2004). Activity in ventromedial prefrontal cortex covaries with sympathetic skin conductance level: A physiological account of a “default mode” of brain function. *NeuroImage*, 22(1), 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.01.019>
- Neurosciences. (2020, September 23). De Boeck Supérieur. <https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807314924-neurosciences>
- Neville, H., Andersson, A., Bagdade, O., Bell, T., Currin, J., Fanning, J., Klein, S., Lauinger, B., Pakulak, E., Paulsen, D., & others. (2008). Effects of music training on brain and cognitive development in under-privileged 3-to 5-year-old children: Preliminary results. *Learning, Arts, and the Brain: The Dana Consortium Report on Arts and Cognition*, The Dana Foundation, New York/Washington, DC, 105–106.
- Neville, H. J., Stevens, C., Pakulak, E., Bell, T. A., Fanning, J., Klein, S., & Isbell, E. (2013). Family-based training program improves brain function, cognition, and behavior in lower socioeconomic status preschoolers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(29), 12138–12143. <https://doi.org/10.1073/pnas.1304437110>
- Nigg, J. T., Swanson, J. M., & Hinshaw, S. P. (1997). Covert visual spatial attention in boys with attention deficit hyperactivity disorder: Lateral effects, methylphenidate response and results for parents. *Neuropsychologia*, 35(2), 165–176. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(96\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(96)00070-X)
- Noble, K. G., Houston, S. M., Kan, E., & Sowell, E. R. (2012). Neural correlates of socioeconomic status in the developing human brain. *Developmental Science*, 15(4), 516–527. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01147.x>
- Noble, W., Jensen, N. S., Naylor, G., Bhullar, N., & Akeroyd, M. A. (2013). A short form of the Speech, Spatial and Qualities of Hearing scale suitable for clinical use: The SSQ12. *International Journal of Audiology*, 52(6), 409–412. <https://doi.org/10.3109/14992027.2013.781278>
- Norman, D. A. (1969). Memory while shadowing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 21(1), 85–93. <https://doi.org/10.1080/14640746908400200>
- Norman, Donald A., & Shallice, T. (1986). Attention to Action. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research and Theory Volume 4* (pp. 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)
- Novak, G. P., Solanto, M., & Abikoff, H. (1995). Spatial orienting & focused attention in attention deficit hyperactivity disorder. *Psychophysiology*, 32(6), 546–559. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1995.tb01231.x>
- Oades, R. D., Dittmann-Balcar, A., & Zerbin, D. (1997). Development and topography of auditory event-related potentials (ERPs): Mismatch and processing negativity in individuals 8-22 years of age. *Psychophysiology*, 34(6), 677–693. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02143.x>

- Oakes, L. M., & Tellinghuisen, D. J. (1994). Examining in infancy: Does it reflect active processing? *Developmental Psychology*, 30(5), 748–756. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.30.5.748>
- Oberlin, B. G., Alford, J. L., & Marrocco, R. T. (2005). Normal attention orienting but abnormal stimulus alerting and conflict effect in combined subtype of ADHD. *Behavioural Brain Research*, 165(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2005.06.041>
- Ochi, M., Fujiwara, T., Mizuki, R., & Kawakami, N. (2014). Association of socioeconomic status in childhood with major depression and generalized anxiety disorder: Results from the World Mental Health Japan survey 2002–2006. *BMC Public Health*, 14, 359. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-359>
- Oken, B. S., Salinsky, M. C., & Elsas, S. M. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: Physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology*, 117(9), 1885–1901. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.01.017>
- Olesen, P. J., Macoveanu, J., Tegnér, J., & Klingberg, T. (2007). Brain activity related to working memory and distraction in children and adults. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 17(5), 1047–1054. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl014>
- Padilla, M. L., Pfefferbaum, A., Sullivan, E. V., Baker, F. C., & Colrain, I. M. (2014a). Dissociation of preparatory attention and response monitoring maturation during adolescence. *Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 125(5), 962–970. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.10.012>
- Padilla, M. L., Pfefferbaum, A., Sullivan, E. V., Baker, F. C., & Colrain, I. M. (2014b). Dissociation of preparatory attention and response monitoring maturation during adolescence. *Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 125(5), 962–970. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.10.012>
- Paetau, R., Ahonen, A., Salonen, O., & Sams, M. (1995). Auditory evoked magnetic fields to tones and pseudowords in healthy children and adults. *Journal of Clinical Neurophysiology: Official Publication of the American Electroencephalographic Society*, 12(2), 177–185. <https://doi.org/10.1097/00004691-199503000-00008>
- Pakulak, E., Stevens, C., & Neville, H. (2018). Neuro-, Cardio-, and Immunoplasticity: Effects of Early Adversity (SSRN Scholarly Paper ID 3121914). *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010416-044115>
- Palfrey, J. S., Levine, M. D., Walker, D. K., & Sullivan, M. (1985). The emergence of attention deficits in early childhood: A prospective study. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics: JDBP*, 6(6), 339–348.
- Palva, J. M., Zhigalov, A., Hirvonen, J., Korhonen, O., Linkenkaer-Hansen, K., & Palva, S. (2013). Neuronal long-range temporal correlations and avalanche dynamics are correlated with behavioral scaling laws. *Proceedings of the National Academy of*

Sciences of the United States of America, 110(9), 3585–3590.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1216855110>

- Pantev, C., Bertrand, O., Eulitz, C., Verkindt, C., Hampson, S., Schuierer, G., & Elbert, T. (1995). Specific tonotopic organizations of different areas of the human auditory cortex revealed by simultaneous magnetic and electric recordings. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 94(1), 26–40. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(94\)00209-4](https://doi.org/10.1016/0013-4694(94)00209-4)
- Parasuraman, R., Nestor, P. G., & Greenwood, P. (1989). Sustained-attention capacity in young and older adults. *Psychology and Aging*, 4(3), 339–345. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.4.3.339>
- 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.
- Parmentier, F. B. R. (2008). Towards a cognitive model of distraction by auditory novelty: The role of involuntary attention capture and semantic processing. *Cognition*, 109(3), 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.09.005>
- Parmentier, F. B. R., & Andrés, P. (2010). The Involuntary Capture of Attention by Sound: Novelty and Postnovelty Distraction in Young and Older Adults. *Experimental Psychology*, 57(1), 68–76. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000009>
- Patel, S. H., & Azzam, P. N. (2005). Characterization of N200 and P300: Selected Studies of the Event-Related Potential. *International Journal of Medical Sciences*, 2(4), 147–154.
- Pawlowski, J., Segabinazi, J. D., Wagner, F., & Bandeira, D. R. (2013). A systematic review of validity procedures used in neuropsychological batteries. *Psychology & Neuroscience*, 6(3), 311–329. <https://doi.org/10.3922/j.psns.2013.3.09>
- Perchet, C., & Garcia-Larrea, L. (2005). Learning to react: Anticipatory mechanisms in children and adults during a visuospatial attention task. *Clinical Neurophysiology*, 116(8), 1906–1917. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.03.022>
- Perchet, Caroline, & Garcia-Larrea, L. (2000). Visuospatial attention and motor reaction in children: An electrophysiological study of the “Posner” paradigm. *Psychophysiology*, 37, 231–241. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3720231>
- 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>
- Petton, M., Perrone-Bertolotti, M., Mac-Auliffe, D., Bertrand, O., Aguera, P.-E., Sipp, F., Batthacharjee, M., Isnard, J., Minotti, L., Rheims, S., Kahane, P., Herbillon, V., & Lachaux, J.-P. (2018). BLAST: A short computerized test to measure the ability to stay on task. Normative behavioral data and detailed cortical dynamics. *BioRxiv*, 498691. <https://doi.org/10.1101/498691>

- Petton, M., Perrone-Bertolotti, M., Mac-Auliffe, D., Bertrand, O., Aguera, P.-E., Sipp, F., Batthacharjee, M., Isnard, J., Minotti, L., Rheims, S., Kahane, P., Herbillon, V., & Lachaux, J.-P. (2019). BLAST: A short computerized test to measure the ability to stay on task. Normative behavioral data and detailed cortical dynamics. *Neuropsychologia*, 134, 107151. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107151>
- Picton, T. W., Goodman, W. S., & Bryce, D. P. (1970). Amplitude of evoked responses to tones of high intensity. *Acta Oto-Laryngologica*, 70(2), 77–82. <https://doi.org/10.3109/00016487009181862>
- Picton, T. W., & Hillyard, S. A. (1974a). Human auditory evoked potentials. II: Effects of attention. *Clinical Neurophysiology*, 36, 191–200.
- Picton, T. W., & Hillyard, S. A. (1974b). Human auditory evoked potentials. II. Effects of attention. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 36(2), 191–199. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(74\)90156-4](https://doi.org/10.1016/0013-4694(74)90156-4)
- Pineda, J. A., Foote, S. L., & Neville, H. J. (1989). Effects of locus coeruleus lesions on auditory, long-latency, event-related potentials in monkey. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 9(1), 81–93.
- Pliszka, S. R., Glahn, D. C., Semrud-Clikeman, M., Franklin, C., Perez, R., Xiong, J., & Liotti, M. (2006). Neuroimaging of inhibitory control areas in children with attention deficit hyperactivity disorder who were treatment naive or in long-term treatment. *The American Journal of Psychiatry*, 163(6), 1052–1060. <https://doi.org/10.1176/ajp.2006.163.6.1052>
- Polanczyk, G., de Lima, M. S., Horta, B. L., Biederman, J., & Rohde, L. A. (2007). The worldwide prevalence of ADHD: A systematic review and metaregression analysis. *The American Journal of Psychiatry*, 164(6), 942–948. <https://doi.org/10.1176/ajp.2007.164.6.942>
- Polanczyk, G. V., Salum, G. A., Sugaya, L. S., Caye, A., & Rohde, L. A. (2015). Annual research review: A meta-analysis of the worldwide prevalence of mental disorders in children and adolescents. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 56(3), 345–365. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12381>
- Polich, J. (2007). Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- Polich, J., Ladish, C., & Burns, T. (1990). Normal variation of P300 in children: Age, memory span, and head size. *International Journal of Psychophysiology*, 9(3), 237–248. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(90\)90056-J](https://doi.org/10.1016/0167-8760(90)90056-J)
- Ponton, C., Eggermont, J. J., Khosla, D., Kwong, B., & Don, M. (2002). Maturation of human central auditory system activity: Separating auditory evoked potentials by dipole source modeling. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 113(3), 407–420. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(01\)00733-7](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(01)00733-7)

- Ponton, C. W., Eggermont, J. J., Kwong, B., & Don, M. (2000). Maturation of human central auditory system activity: Evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical Neurophysiology*, 111(2), 220–236. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00236-9](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00236-9)
- Posner cueing task. (2020). In Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Posner\\_cueing\\_task&oldid=980137953](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Posner_cueing_task&oldid=980137953)
- Posner, M. I., Cohen, Y., & Rafal, R. D. (1982). Neural systems control of spatial orienting. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 298(1089), 187–198. <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0081>
- Posner, M. I., Walker, J. A., Friedrich, F. J., & Rafal, R. D. (1984). Effects of parietal injury on covert orienting of attention. *Journal of Neuroscience*, 4(7), 1863–1874. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.04-07-01863.1984>
- Posner, M., & Petersen, S. (1990). The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25–42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Posner, M., Rothbart, M., & Rueda, M. (2014). Developing attention and self-regulation in childhood (pp. 541–569).
- Posner, Michael I. (1978). *Chronometric Explorations of Mind: The Third Paul M. Fitts Lectures, Delivered at the University of Michigan, September 1976*. L. Erlbaum Associates.
- Posner, Michael I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Posner, Michael I. (2012). Attentional Networks and Consciousness. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00064>
- Posner, Michael I., & Boies, S. J. (1971). Components of attention. *Psychological Review*, 78(5), 391–408. <https://doi.org/10.1037/h0031333>
- Posner, Michael I., & DiGirolamo, G. J. (1998). Executive attention: Conflict, target detection, and cognitive control. In *The attentive brain* (pp. 401–423). The MIT Press.
- Posner, Michael I., & Driver, J. (1992). The neurobiology of selective attention. *Current Opinion in Neurobiology*, 2(2), 165–169.
- Posner, Michael I., & Rafal, R. D. (1987). Cognitive theories of attention and the rehabilitation of attentional deficits. In *Neuropsychological rehabilitation* (pp. 182–201). Guilford Press.
- Posner, Michael I., Rothbart, M. K., Sheese, B. E., & Voelker, P. (2014a). Developing Attention: Behavioral and Brain Mechanisms [Review Article]. *Advances in Neuroscience; Hindawi*. <https://doi.org/10.1155/2014/405094>
- Posner, Michael I., Rothbart, M. K., Sheese, B. E., & Voelker, P. (2014b). Developing Attention: Behavioral and Brain Mechanisms. *Advances in Neuroscience (Hindawi)*, 2014, 405094. <https://doi.org/10.1155/2014/405094>



- Posner, Michael I, Rothbart, M. K., & Tang, Y.-Y. (2015). Enhancing attention through training. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2014.12.008>
- Praamstra, P., Kourtis, D., Fei Kwok, H., & Oostenveld, R. (2006). Neurophysiology of Implicit Timing in Serial Choice Reaction-Time Performance. *The Journal of Neuroscience*, 26(20), 5448–5455. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0440-06.2006>
- Prescott, J., Connolly, J., & Gruzelier, J. (1984). The augmenting/reducing phenomenon in the auditory evoked potential. *Biological Psychology*, 19, 31–44. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(84\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0301-0511(84)90008-5)
- Psytest—KiTAP. (n.d.). Retrieved September 12, 2020, from [https://www.psytest.net/index.php/en\\_US/Produkte/KiTAP.html](https://www.psytest.net/index.php/en_US/Produkte/KiTAP.html)
- Purper-Ouakil, D., Ramoz, N., Lepagnol-Bestel, A.-M., Gorwood, P., & Simonneau, M. (2011). Neurobiology of Attention Deficit/Hyperactivity Disorder. *Pediatric Research*, 69(8), 69–76. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e318212b40f>
- Putkinen, V., Niinikuru, R., Lipsanen, J., Tervaniemi, M., & Huutilainen, M. (2012). Fast measurement of auditory event-related potential profiles in 2-3-year-olds. *Developmental Neuropsychology*, 37(1), 51–75. <https://doi.org/10.1080/87565641.2011.615873>
- Putois, B., Leslie, W., Gustin, M. P., Challamel, M.-J., Raoux, A., Guignard-Perret, A., Weick, D., Sauzeau, J.-B., Herbillon, V., Zourou, F., Spruyt, K., & Franco, P. (2017). The French Sleep Disturbance Scale for Children. *Sleep Medicine*, 32, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2016.12.008>
- R Core Team. (2017). R: A Language and Environment for Statistical Computing. {R Foundation for Statistical Computing. URL <https://www.R-project.org/>
- Reis Lellis, V. R., de Castro Mariani, M. M., de Fátima Ribeiro, A., Cantiere, C. N., Veloz Teixeira, M. C. T., & Rodrigues Carreiro, L. R. (2013). Voluntary and automatic orienting of attention during childhood development. *Psychology & Neuroscience*, 6(1), 15–21. <https://doi.org/10.3922/j.psns.2013.1.04>
- Reiss, F., Meyrose, A.-K., Otto, C., Lampert, T., Klasen, F., & Ravens-Sieberer, U. (2019). Socioeconomic status, stressful life situations and mental health problems in children and adolescents: Results of the German BELLA cohort-study. *PLoS ONE*, 14(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213700>
- Rentsch, J., Shen, C., Jockers-Scherübl, M. C., Gallinat, J., & Neuhaus, A. H. (2015). Auditory Mismatch Negativity and Repetition Suppression Deficits in Schizophrenia Explained by Irregular Computation of Prediction Error. *PLoS ONE*, 10(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126775>
- Reynaud, A., Froesel, M., Guedj, C., Ben Hadj Hassen, S., Cléry, J., Meunier, M., Ben Hamed, S., & Hadj-Bouziane, F. (2019). Atomoxetine improves attentional orienting in a predictive context. *Neuropharmacology*, 150, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2019.03.012>

- Reynolds, G. D., & Romano, A. C. (2016). The Development of Attention Systems and Working Memory in Infancy. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00015>
- Riccio, C. A., Hynd, G. W., Cohen, M. J., Hall, J., & Molt, L. (1994). Comorbidity of central auditory processing disorder and attention-deficit hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 33(6), 849–857.
- Richards, J. E., & Casey, B. J. (1991). Heart rate variability during attention phases in young infants. *Psychophysiology*, 28(1), 43–53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1991.tb03385.x>
- Ridderinkhof, K. R., Band, G. P. H., & Logan, G. D. (1999). A study of adaptive behavior: Effects of age and irrelevant information on the ability to inhibit one's actions. *Acta Psychologica*, 101(2–3), 315–337. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(99\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(99)00010-4)
- Ridderinkhof, K. R., & van der Stelt, O. (2000). Attention and selection in the growing child: Views derived from developmental psychophysiology. *Biological Psychology*, 54(1–3), 55–106. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00053-3)
- Riggins, T., & Scott, L. S. (2020). P300 development from infancy to adolescence. *Psychophysiology*, 57(7), e13346. <https://doi.org/10.1111/psyp.13346>
- Rinne, T., Särkkä, A., Degerman, A., Schröger, E., & Alho, K. (2006). Two separate mechanisms underlie auditory change detection and involuntary control of attention. *Brain Research*, 1077(1), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.01.043>
- Ross-Sheehy, S., Schneegans, S., & Spencer, J. P. (2015). The Infant Orienting With Attention task: Assessing the neural basis of spatial attention in infancy. *Infancy: The Official Journal of the International Society on Infant Studies*, 20(5), 467–506. <https://doi.org/10.1111/infa.12087>
- Rothbart, M. K., Sheese, B. E., Rueda, M. R., & Posner, M. I. (2011). Developing Mechanisms of Self-Regulation in Early Life. *Emotion Review*, 3(2), 207–213. <https://doi.org/10.1177/1754073910387943>
- 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>
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P., & Posner, M. I. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, 42(8), 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Rueda, M. R., Pozuelos, J. P., Cómbita, L. M., & Cómbita, L. M. (2015). Cognitive Neuroscience of Attention <br /><em>From brain mechanisms to individual differences in efficiency</em>. *AIMS Neuroscience*, 2(4), 183. <https://doi.org/10.3934/Neuroscience.2015.4.183>

- Ruff, H. A., & Capozzoli, M. C. (2003). Development of attention and distractibility in the first 4 years of life. *Developmental Psychology*, 39(5), 877–890. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.39.5.877>
- Ruhnau, P., Herrmann, B., Maess, B., Brauer, J., Friederici, A. D., & Schröger, E. (2013). Processing of complex distracting sounds in school-aged children and adults: Evidence from EEG and MEG data. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00717>
- Ruhnau, P., Wetzel, N., Widmann, A., & Schröger, E. (2010). The modulation of auditory novelty processing by working memory load in school age children and adults: A combined behavioral and event-related potential study. *Bmc Neuroscience*, 11(1), 126.
- Rushworth, M. F. S., Nixon, P. D., Renowden, S., Wade, D. T., & Passingham, R. E. (1997). The left parietal cortex and motor attention. *Neuropsychologia*, 35(9), 1261–1273. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00050-X)
- Sadaghiani, S., Scheeringa, R., Lehongre, K., Morillon, B., Giraud, A.-L., & Kleinschmidt, A. (2010). Intrinsic connectivity networks, alpha oscillations, and tonic alertness: A simultaneous electroencephalography/functional magnetic resonance imaging study. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 30(30), 10243–10250. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1004-10.2010>
- Sanders, L. D., & Zobel, B. H. (2012). Nonverbal spatially selective attention in 4- and 5-year-old children. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(3), 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.03.004>
- Sangal, R. B., & Sangal, J. M. (2006). Attention-deficit/hyperactivity disorder: Use of cognitive evoked potential (P300) to predict treatment response. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 117(9), 1996–2006. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.06.004>
- SanMiguel, I., Corral, M.-J., & Escera, C. (2008). When loading working memory reduces distraction: Behavioral and electrophysiological evidence from an auditory-visual distraction paradigm. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(7), 1131–1145. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20078>
- SanMiguel, I., Linden, D., & Escera, C. (2010). Attention capture by novel sounds: Distraction versus facilitation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(4), 481–515. <https://doi.org/10.1080/09541440902930994>
- SanMiguel, I., Morgan, H., Klein, C., Linden, D., & Escera, C. (2010). On the functional significance of Novelty-P3: Facilitation by unexpected novel sounds. *Biological Psychology*, 83, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2009.11.012>
- Satterfield, J. H., Schell, A. M., & Nicholas, T. (1994). Preferential neural processing of attended stimuli in attention-deficit hyperactivity disorder and normal boys. *Psychophysiology*, 31(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1994.tb01018.x>
- Sawaki, R., Geng, J. J., & Luck, S. J. (2012). A common neural mechanism for preventing and terminating the allocation of attention. *The Journal of Neuroscience: The Official*

Journal of the Society for Neuroscience, 32(31), 10725–10736.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1864-12.2012>

- Scherg, M., Vajsar, J., & Picton, T. W. (1989). A source analysis of the late human auditory evoked potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1(4), 336–355.  
<https://doi.org/10.1162/jocn.1989.1.4.336>
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1–66.  
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>
- Schochat, E., Scheuer, C. I., & Andrade, Ê. R. de. (2002). ABR and auditory P300 findings in children with ADHD. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 60(3B), 742–747.  
<https://doi.org/10.1590/S0004-282X2002000500012>
- Schröger, E., Giard, M. H., & Wolff, C. (2000). Auditory distraction: Event-related potential and behavioral indices. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 111(8), 1450–1460.  
[https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(00\)00337-0](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(00)00337-0)
- Schröger, E., & Wolff, C. (1998). Attentional orienting and reorienting is indicated by human event-related brain potentials. *Neuroreport*, 9(15), 3355–3358.
- Schröger, Erich, Marzecová, A., & SanMiguel, I. (2015). Attention and prediction in human audition: A lesson from cognitive psychophysiology. *The European Journal of Neuroscience*, 41(5), 641–664. <https://doi.org/10.1111/ejn.12816>
- Schulz, K. P., Bédard, A.-C. V., Fan, J., Clerkin, S. M., Dima, D., Newcorn, J. H., & Halperin, J. M. (2014). Emotional bias of cognitive control in adults with childhood attention-deficit/hyperactivity disorder. *NeuroImage: Clinical*, 5, 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.nicl.2014.05.016>
- Segalowitz, S. J., & Davies, P. L. (2004). Charting the maturation of the frontal lobe: An electrophysiological strategy. *Brain and Cognition*, 55(1), 116–133.  
[https://doi.org/10.1016/S0278-2626\(03\)00283-5](https://doi.org/10.1016/S0278-2626(03)00283-5)
- Segalowitz, Sidney J., Santesso, D. L., & Jetha, M. K. (2010). Electrophysiological changes during adolescence: A review. *Brain and Cognition*, 72(1), 86–100.  
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.10.003>
- Segalowitz, Sidney J., Santesso, D. L., Murphy, T. I., Homan, D., Chantziantoniou, D. K., & Khan, S. (2010). Retest reliability of medial frontal negativities during performance monitoring. *Psychophysiology*, 47(2), 260–270. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00942.x>
- Segalowitz, Sidney J., Unsal, A., & Dywan, J. (1992). Cleverness and wisdom in 12-year-olds: Electrophysiological evidence for late maturation of the frontal lobe. *Developmental Neuropsychology*, 8(2–3), 279–298.  
<https://doi.org/10.1080/87565649209540528>

- Serences, J. T., Yantis, S., Culbertson, A., & Awh, E. (2004). Preparatory activity in visual cortex indexes distractor suppression during covert spatial orienting. *Journal of Neurophysiology*, 92(6), 3538–3545. <https://doi.org/10.1152/jn.00435.2004>
- Shafer, V. L., Morr, M. L., Kreuzer, J. A., & Kurtzberg, D. (2000). Maturation of mismatch negativity in school-age children. *Ear and Hearing*, 21(3), 242–251. <https://doi.org/10.1097/00003446-200006000-00008>
- Sharma, A., Kraus, N., McGee, T. J., & Nicol, T. G. (1997). Developmental changes in P1 and N1 central auditory responses elicited by consonant-vowel syllables. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 104(6), 540–545. [https://doi.org/10.1016/s0168-5597\(97\)00050-6](https://doi.org/10.1016/s0168-5597(97)00050-6)
- Sharma, Anu, Dorman, M. F., & Kral, A. (2005). The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants. *Hearing Research*, 203(1–2), 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.12.010>
- Shestakova, A., Huotilainen, M., Ceponiene, R., & Cheour, M. (2003). Event-related potentials associated with second language learning in children. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 114(8), 1507–1512. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(03\)00134-2](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(03)00134-2)
- Shomstein, S. (2012). Cognitive functions of the posterior parietal cortex: Top-down and bottom-up attentional control. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnint.2012.00038>
- Slagter, H. A., Prinssen, S., Reteig, L. C., & Mazaheri, A. (2016). Facilitation and inhibition in attention: Functional dissociation of pre-stimulus alpha activity, P1, and N1 components. *NeuroImage*, 125, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.09.058>
- Slobodin, O., Cassuto, H., & Berger, I. (2015). Age-Related Changes in Distractibility: Developmental Trajectory of Sustained Attention in ADHD: *Journal of Attention Disorders*. <https://doi.org/10.1177/1087054715575066>
- Smith, A. B., Halari, R., Giampetro, V., Brammer, M., & Rubia, K. (2011). Developmental effects of reward on sustained attention networks. *NeuroImage*, 56(3), 1693–1704. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.072>
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Leonard, C. M., Welcome, S. E., Kan, E., & Toga, A. W. (2004). Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 24(38), 8223–8231. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1798-04.2004>
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., & Lushene, R. E. (1970). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory*. <http://ubir.buffalo.edu/xmlui/handle/10477/2895>
- Squires, N. K., Squires, K. C., & Hillyard, S. A. (1975). Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 38(4), 387–401. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(75\)90263-1](https://doi.org/10.1016/0013-4694(75)90263-1)

- Stanford, M. S., Mathias, C. W., Dougherty, D. M., Lake, S. L., Anderson, N. E., & Patton, J. H. (2009). Fifty years of the Barratt Impulsiveness Scale: An update and review. *Personality and Individual Differences*, 47(5), 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2009.04.008>
- Stefanics, G., Kremláček, J., & Czigler, I. (2014). Visual mismatch negativity: A predictive coding view. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00666>
- Stevens, C., & Bavelier, D. (2012). The role of selective attention on academic foundations: A cognitive neuroscience perspective. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2 Suppl 1, S30-48. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.11.001>
- Stevens, C., Lauinger, B., & Neville, H. (2009). Differences in the neural mechanisms of selective attention in children from different socioeconomic backgrounds: An event-related brain potential study. *Developmental Science*, 12(4), 634–646. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00807.x>
- Stige, S., Fjell, A. M., Smith, L., Lindgren, M., & Walhovd, K. B. (2007). The development of visual P3a and P3b. *Developmental Neuropsychology*, 32(1), 563–584. <https://doi.org/10.1080/87565640701361096>
- Stuss, D. T., & Benson, D. F. (1984). Neuropsychological studies of the frontal lobes. *Psychological Bulletin*, 95(1), 3–28.
- Sullivan, L. (1976). Selective Attention and Secondary Message Analysis: A Reconsideration of Broadbent's Filter Model of Selective Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 28(2), 167–178. <https://doi.org/10.1080/14640747608400549>
- Sussman, E., Winkler, I., & Schröger, E. (2003). Top-down control over involuntary attention switching in the auditory modality. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10(3), 630–637. <https://doi.org/10.3758/BF03196525>
- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science (New York, N.Y.)*, 150(3700), 1187–1188. <https://doi.org/10.1126/science.150.3700.1187>
- Sutton, Samuel, Braren, M., Zubin, J., & John, E. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150(3700), 1187–1188.
- Suwazono, S., Machado, L., & Knight, R. T. (2000). Predictive value of novel stimuli modifies visual event-related potentials and behavior. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 111(1), 29–39. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(99\)00186-8](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(99)00186-8)
- Szuromi, B., Czobor, P., Komlósi, S., & Bitter, I. (2011). P300 deficits in adults with attention deficit hyperactivity disorder: A meta-analysis. *Psychological Medicine*, 41(7), 1529–1538. <https://doi.org/10.1017/S0033291710001996>
- Takeshita, K., Nagamine, T., Thuy, D. H. D., Satow, T., Matsushashi, M., Yamamoto, J., Takayama, M., Fujiwara, N., & Shibasaki, H. (2002). Maturational change of parallel

auditory processing in school-aged children revealed by simultaneous recording of magnetic and electric cortical responses. *Clinical Neurophysiology*, 113(9), 1470–1484. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00202-X](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00202-X)

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>

Tao, T., Wang, L., Fan, C., & Gao, W. (2014). Development of self-control in children aged 3 to 9 years: Perspective from a dual-systems model. *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep07272>

Tau, G. Z., & Peterson, B. S. (2010). Normal Development of Brain Circuits. *Neuropsychopharmacology*, 35(1), 147–168. <https://doi.org/10.1038/npp.2009.115>

TEA-CH - Test d'Évaluation de l'Attention chez l'enfant. (n.d.). Pearson Clinical & Talent Assessment. Retrieved September 12, 2020, from <https://www.pearsonclinical.fr/tea-ch-test-devaluation-de-lattention-chez-lenfant>

Tecce, J. J. (1972). Contingent negative variation (CNV) and psychological processes in man. *Psychological Bulletin*, 77(2), 73–108. <https://doi.org/10.1037/h0032177>

Tecce, Joseph J. (1971). Contingent Negative Variation and Individual Differences A New Approach in Brain Research. *Archives of General Psychiatry*, 24(1), 1–16. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.1971.01750070003001>

Teder-Sälejärvi, W. A., & Hillyard, S. A. (1998). The gradient of spatial auditory attention in free field: An event-related potential study. *Perception & Psychophysics*, 60(7), 1228–1242. <https://doi.org/10.3758/bf03206172>

Terrasa, J. L., Montoya, P., González-Roldán, A. M., & Sitges, C. (2018). Inhibitory Control Impairment on Somatosensory Gating Due to Aging: An Event-Related Potential Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00280>

Theeuwes, J. (1992). Perceptual selectivity for color and form. *Perception & Psychophysics*, 51(6), 599–606. <https://doi.org/10.3758/BF03211656>

Thillay, A., Roux, S., Gissot, V., Carreau-Martin, I., Knight, R. T., Bonnet-Brilhault, F., & Bidet-Caulet, A. (2015). Sustained attention and prediction: Distinct brain maturation trajectories during adolescence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00519>

Thomas, J. R., Gallagher, J. D., & Purvis, G. J. (1981). Reaction Time and Anticipation Time: Effects of Development. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 52(3), 359–367. <https://doi.org/10.1080/02701367.1981.10607883>

Thomas, K. M., & Nelson, C. A. (1996). Age-related changes in the electrophysiological response to visual stimulus novelty: A topographical approach. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 98(4), 294–308. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(95\)00280-4](https://doi.org/10.1016/0013-4694(95)00280-4)

- Thomas, M. S. C., Baughman, F. D., & Lehalle, H. (2014). Neuroconstructivisme: Comprendre les trajectoires développementales typiques et atypiques. *Enfance*, N° 3(3), 205–236.
- Tillman, C. M., Thorell, L. B., Brocki, K. C., & Bohlin, G. (2007). Motor Response Inhibition and Execution in the Stop-Signal Task: Development and Relation to ADHD Behaviors. *Child Neuropsychology*, 14(1), 42–59. <https://doi.org/10.1080/09297040701249020>
- Timsit-Berthier, M., & Hausman, J. (1972). Étude de la VCN et du phénomène de préparation motrice chez des enfants de 5 à 15 ans. *Revue d'Electroencéphalographie et de Neurophysiologie Clinique*, 2(2), 141–146. [https://doi.org/10.1016/S0370-4475\(72\)80051-0](https://doi.org/10.1016/S0370-4475(72)80051-0)
- Toga, A. W., Thompson, P. M., & Sowell, E. R. (2006a). Mapping brain maturation. *Trends in Neurosciences*, 29(3), 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.01.007>
- Toga, A. W., Thompson, P. M., & Sowell, E. R. (2006b). Mapping brain maturation. *Trends in Neurosciences*, 29(3), 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.01.007>
- Touzani, M. (2000). Le processus de validation des échelles de mesure: Fiabilité et validité. Séminaire de Méthodologie de Recherche Du LIGUE.
- Tracy, J. I., Mohamed, F., Faro, S., Tiver, R., Pinus, A., Bloomer, C., Pyrros, A., & Harvan, J. (2000). The effect of autonomic arousal on attentional focus. *Neuroreport*, 11(18), 4037–4042. <https://doi.org/10.1097/00001756-200012180-00027>
- Treisman, A., & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95(1), 15–48. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.95.1.15>
- Treisman, A. M., & Riley, J. G. (1969). Is selective attention selective perception or selective response? A further test. *Journal of Experimental Psychology*, 79(1, Pt.1), 27–34. <https://doi.org/10.1037/h0026890>
- Treisman, A., & Souther, J. (1985). Search asymmetry: A diagnostic for preattentive processing of separable features. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114(3), 285–310. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.114.3.285>
- Treue, S. (2003). Visual attention: The where, what, how and why of saliency. *Current Opinion in Neurobiology*, 13(4), 428–432. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(03\)00105-3](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(03)00105-3)
- Tsai, M.-L., Hung, K.-L., & Lu, H.-H. (2012). Auditory Event-related Potentials in Children With Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Pediatrics & Neonatology*, 53(2), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.pedneo.2012.01.009>
- Ulke, C., Rullmann, M., Huang, J., Luthardt, J., Becker, G.-A., Patt, M., Meyer, P. M., Tiepolt, S., Hesse, S., Sabri, O., & Strauß, M. (2019). Adult attention-deficit/hyperactivity disorder is associated with reduced norepinephrine transporter availability in right attention networks: A (S,S)-O-[ 11 C]methylreboxetine positron emission tomography study. *Translational Psychiatry*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41398-019-0619-y>



- Underwood, G. (1977). Contextual facilitation from attended and unattended messages. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 16(1), 99–106. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(77\)80011-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(77)80011-X)
- Unsworth, N., & Robison, M. K. (2017). A locus coeruleus-norepinephrine account of individual differences in working memory capacity and attention control. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(4), 1282–1311. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1220-5>
- Ursache, A., & Noble, K. G. (2016). Neurocognitive development in socioeconomic context: Multiple mechanisms and implications for measuring socioeconomic status. *Psychophysiology*, 53(1), 71–82. <https://doi.org/10.1111/psyp.12547>
- Vaidya, C. J., Bunge, S. A., Dudukovic, N. M., Zalecki, C. A., Elliott, G. R., & Gabrieli, J. D. E. (2005). Altered neural substrates of cognitive control in childhood ADHD: Evidence from functional magnetic resonance imaging. *The American Journal of Psychiatry*, 162(9), 1605–1613. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.162.9.1605>
- van Boxtel, G. J. M., van der Molen, M. W., Jennings, J. R., & Brunia, C. H. M. (2001). A psychophysiological analysis of inhibitory motor control in the stop-signal paradigm. *Biological Psychology*, 58(3), 229–262. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(01\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(01)00117-X)
- van den Wildenberg, W. P., & Crone, E. A. (2005). Development of response inhibition and decision-making across childhood: A cognitive neuroscience perspective. *Focus on Child Psychology Research*, 23–42.
- Van der Meere, J., & Sergeant, J. A. (1988). Controlled processing and vigilance in hyperactivity: Time will tell. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 16(6), 641–655. <https://doi.org/10.1007/BF00913475>
- van Leeuwen, T. H., Steinhausen, H.-Ch., Overtom, C. C. E., Pascual-Marqui, R. D., van't Klooster, B., Rothenberger, A., Sergeant, J. A., & Brandeis, D. (1998). The continuous performance test revisited with neuroelectric mapping: Impaired orienting in children with attention deficits. *Behavioural Brain Research*, 94(1), 97–110. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(97\)00173-3](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(97)00173-3)
- van Mourik, R., Oosterlaan, J., Heslenfeld, D. J., Konig, C. E., & Sergeant, J. A. (2007). When distraction is not distracting: A behavioral and ERP study on distraction in ADHD. *Clinical Neurophysiology*, 118(8), 1855–1865. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.05.007>
- van Rijn, H., Kononowicz, T. W., Meck, W. H., Ng, K. K., & Penney, T. B. (2011). Contingent negative variation and its relation to time estimation: A theoretical evaluation. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnint.2011.00091>
- van Zomeren, A., & Brouwer, W. (1994). *Clinical Neuropsychology of Attention*.
- Volpe, U., Mucci, A., Bucci, P., Merlotti, E., Galderisi, S., & Maj, M. (2007). The cortical generators of P3a and P3b: A LORETA study. *Brain Research Bulletin*, 73(4–6), 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2007.03.003>

- Wainwright, A., & Bryson, S. E. (2002). The development of exogenous orienting: Mechanisms of control. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82(2), 141–155. [https://doi.org/10.1016/s0022-0965\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/s0022-0965(02)00002-4)
- WAIS-IV - Échelle d'intelligence de Wechsler pour adultes—4ème édition. (n.d.). Pearson Clinical & Talent Assessment. Retrieved September 12, 2020, from <https://www.pearsonclinical.fr/wais-iv-nouvelle-version-de-lechelle-dintelligence-de-wechsler-pour-adultes-quatrieme-edition>
- Walter, W. G. (1966). Electrophysiologic contributions to psychiatric therapy. *Current Psychiatric Therapies*, 6, 13–25.
- Walter, W. Grey, Cooper, R., Aldridge, V. J., McCALLUM, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent Negative Variation: An Electric Sign of Sensori-Motor Association and Expectancy in the Human Brain. *Nature*, 203(4943), 380–384. <https://doi.org/10.1038/203380a0>
- Walter, W. Grey, Cooper, R., Aldridge, V., McCallum, W., & Winter, A. (1964). Contingent negative variation: An electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203(4943), 380–384.
- Wan, L., Friedman, B. H., Boutros, N. N., & Crawford, H. J. (2008). P50 Sensory Gating and Attentional Performance. *International Journal of Psychophysiology : Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 67(2), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2007.10.008>
- Wass, S. V., Daubney, K., Golan, J., Logan, F., & Kushnerenko, E. (2019). Elevated physiological arousal is associated with larger but more variable neural responses to small acoustic change in children during a passive auditory attention task. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 37, 100612. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.12.010>
- Wass, S. V. (2017). Understanding short-term interactions between arousal and attention in infants and children: Applying the Aston-Jones framework. *BioRxiv*, 190108. <https://doi.org/10.1101/190108>
- Wass, S.V., de Barbaro, K., & Clackson, K. (2015). Tonic and phasic co-variation of peripheral arousal indices in infants. *Biological Psychology*, 111, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.08.006>
- Weerts, T. C., & Lang, P. J. (1973). The effects of eye fixation and stimulus and response location on the contingent negative variation (CNV). *Biological Psychology*, 1(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(73\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0301-0511(73)90010-0)
- Weisser, R., Weisbrod, M., Roehrig, M., Rupp, A., Schroeder, J., & Scherg, M. (2001). Is frontal lobe involved in the generation of auditory evoked P50? *NeuroReport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, 12(15), 3303–3307. <https://doi.org/10.1097/00001756-200110290-00031>

- Weissman, D. H., Roberts, K. C., Visscher, K. M., & Woldorff, M. G. (2006). The neural bases of momentary lapses in attention. *Nature Neuroscience*, 9(7), 971–978. <https://doi.org/10.1038/nn1727>
- Westermann, G., Mareschal, D., Johnson, M. H., Sirois, S., Spratling, M. W., & Thomas, M. S. C. (2007). Neuroconstructivism. *Developmental Science*, 10(1), 75–83. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00567.x>
- Wetzel, N., Berti, S., Widmann, A., & Schröger, E. (2004). Distraction and reorientation in children: A behavioral and ERP study. *Neuroreport*, 15(8), 1355–1358. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000129858.40478.be>
- Wetzel, N., Buttellmann, D., Schieler, A., & Widmann, A. (2015). Infant and adult pupil dilation in response to unexpected sounds. *Developmental Psychobiology*, 58. <https://doi.org/10.1002/dev.21377>
- Wetzel, N., Buttellmann, D., Schieler, A., & Widmann, A. (2016). Infant and adult pupil dilation in response to unexpected sounds. *Developmental Psychobiology*, 58(3), 382–392. <https://doi.org/10.1002/dev.21377>
- Wetzel, N., Scharf, F., & Widmann, A. (2018). Can't Ignore-Distraction by Task-Irrelevant Sounds in Early and Middle Childhood. *Child Development*. <https://doi.org/10.1111/cdev.13109>
- Wetzel, N., & Schröger, E. (2007). Cognitive control of involuntary attention and distraction in children and adolescents. *Brain Research*, 1155, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.04.022>
- Wetzel, N., & Schröger, E. (2014). On the development of auditory distraction: A review: Development of auditory distraction. *PsyCh Journal*, 3(1), 72–91. <https://doi.org/10.1002/pchj.49>
- Wetzel, N., Schröger, E., & Widmann, A. (2013). The dissociation between the P3a event-related potential and behavioral distraction: P3a and behavioral distraction. *Psychophysiology*, 50(9), 920–930. <https://doi.org/10.1111/psyp.12072>
- Wetzel, N., Schröger, E., & Widmann, A. (2016). Distraction by Novel and Pitch-Deviant Sounds in Children. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01949>
- Wetzel, N., Widmann, A., Berti, S., & Schröger, E. (2006). The development of involuntary and voluntary attention from childhood to adulthood: A combined behavioral and event-related potential study. *Clinical Neurophysiology*, 117(10), 2191–2203. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.06.717>
- Wetzel, N., Widmann, A., & Schröger, E. (2009). The cognitive control of distraction by novelty in children aged 7–8 and adults. *Psychophysiology*, 46(3), 607–616. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00789.x>

- Wetzel, N., Widmann, A., & Schröger, E. (2011). Processing of novel identifiability and duration in children and adults. *Biological Psychology*, 86(1), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.10.005>
- Wetzel, N., Widmann, A., & Schröger, E. (2012). Distraction and facilitation—two faces of the same coin? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(3), 664–674. <https://doi.org/10.1037/a0025856>
- Widmann, A., Schröger, E., & Wetzel, N. (2018). Emotion lies in the eye of the listener: Emotional arousal to novel sounds is reflected in the sympathetic contribution to the pupil dilation response and the P3. *Biological Psychology*, 133, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.01.010>
- 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>
- Wijers, A. A., Mulder, G., Okita, T., Mulder, L. J., & Scheffers, M. K. (1989). Attention to color: An analysis of selection, controlled search, and motor activation, using event-related potentials. *Psychophysiology*, 26(1), 89–109. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1989.tb03137.x>
- WISC-V - Échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents—5ème édition. (n.d.). Pearson Clinical & Talent Assessment. Retrieved September 12, 2020, from <https://www.pearsonclinical.fr/wisc-v>
- Woldorff, M. G., & Hillyard, S. A. (1991). Modulation of early auditory processing during selective listening to rapidly presented tones. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 79(3), 170–191. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(91\)90136-r](https://doi.org/10.1016/0013-4694(91)90136-r)
- Woods, D. L. (1995). The component structure of the N1 wave of the human auditory evoked potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. Supplement*, 44, 102–109.
- 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.
- Wronka, E., Kaiser, J., & Coenen, A. M. L. (2012). Neural generators of the auditory evoked potential components P3a and P3b. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 72(1), 51–64.
- Wunderlich, J. L., Cone-Wesson, B. K., & Shepherd, R. (2006). Maturation of the cortical auditory evoked potential in infants and young children. *Hearing Research*, 212(1–2), 185–202. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2005.11.010>
- Yadon, C. A., Bugg, J. M., Kisley, M. A., & Davalos, D. B. (2009). P50 sensory gating is related to performance on select tasks of cognitive inhibition. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 9(4), 448–458. <https://doi.org/10.3758/CABN.9.4.448>

- Yago, E., Escera, C., Alho, K., Giard, M.-H., & Serra-Grabulosa, J. M. (2003). Spatiotemporal dynamics of the auditory novelty-P3 event-related brain potential. *Cognitive Brain Research*, 16(3), 383–390. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(03\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(03)00052-1)
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit Formation. *Journal of Comparative Neurology & Psychology*, 18, 459–482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- Yingling, C. D., & Nethercut, G. E. (1983). Evoked responses to frequency shifted tones: Tonotopic and contextual determinants. *International Journal of Neuroscience*, 22(1–2), 107–118. <https://doi.org/10.3109/00207459308987389>
- Yvert, B., Fischer, C., Bertrand, O., & Pernier, J. (2005). Localization of human supratemporal auditory areas from intracerebral auditory evoked potentials using distributed source models. *NeuroImage*, 28(1), 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.05.056>
- Yvert, B., Fischer, C., Guénot, M., Krolak-Salmon, P., Isnard, J., & Pernier, J. (2002). Simultaneous intracerebral EEG recordings of early auditory thalamic and cortical activity in human. *European Journal of Neuroscience*, 16(6), 1146–1150. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2002.02162.x>
- Zerlin, S., & Davis, H. (1967). The variability of single evoked vertex potentials in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 23(5), 468–472. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(67\)90190-3](https://doi.org/10.1016/0013-4694(67)90190-3)
- Zhang, S., Hu, S., Hu, J., Wu, P.-L., Chao, H. H., & Li, C. R. (2015). Barratt Impulsivity and Neural Regulation of Physiological Arousal. *PLoS ONE*, 10(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129139>
- Zhu, Y., Chen, X., Zhao, H., Chen, M., Tian, Y., Liu, C., Han, Z. R., Lin, X., Qiu, J., Xue, G., Shu, H., & Qin, S. (2019). Socioeconomic status disparities affect children's anxiety and stress-sensitive cortisol awakening response through parental anxiety. *Psychoneuroendocrinology*, 103, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2019.01.008>
- Zimmermann, P., & Fimm, B. (2002). A test battery for attentional performance. In *Applied Neuropsychology of Attention. Theory, Diagnosis and Rehabilitation*. (Psychology press, pp. 110–151). Leclercq, M and Zimmermann, P.