



HAL
open science

Marqueurs de développement de l'attention exécutive chez l'enfant d'âge préscolaire

Marie Anquetil

► **To cite this version:**

Marie Anquetil. Marqueurs de développement de l'attention exécutive chez l'enfant d'âge préscolaire. Psychologie. Normandie Université, 2023. Français. NNT : 2023NORMC034 . tel-04445912

HAL Id: tel-04445912

<https://theses.hal.science/tel-04445912>

Submitted on 8 Feb 2024

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

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

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité **PSYCHOLOGIE**

Préparée au sein de l'**Université de Caen Normandie**

Marqueurs de développement de l'attention exécutive chez l'enfant d'âge préscolaire

Présentée et soutenue par

MARIE ANQUETIL

Thèse soutenue le 19/12/2023

devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------------|--|-----------------------|
| MME JULIE BERTELS | Maître de conférences HDR - Université Libre de BRUXELLES - BELGIQUE | Rapporteur du jury |
| M. JEAN-PHILIPPE LACHAUX | Directeur de recherche - UNIVERSITE LYON 1 CLAUDE BERNARD | Rapporteur du jury |
| M. HERVÉ SEGOND | Maître de conférences HDR - UNIVERSITE STRASBOURG | Membre du jury |
| M. CORENTIN GONTHIER | Professeur des universités - UNIVERSITE NANTES | Président du jury |
| MME SANDRINE ROSSI | Professeur des universités - Université de Caen Normandie | Directeur de thèse |
| MME NADEGE ROCHE LABARBE | Maître de conférences HDR - Université de Caen Normandie | Co-directeur de thèse |

Thèse dirigée par **SANDRINE ROSSI** (Laboratoire de Psychologie de Caen Normandie) et **NADEGE ROCHE LABARBE** (Mobilités : vieillissement, pathologie, santé - COMETE)

Remerciements

« Une foule de petites métamorphoses s'accumulent en moi sans que j'y prenne garde et puis, un beau jour, il se produit une véritable révolution. »

Jean-Paul Sartre

Woody Allen disait : « L'éternité, c'est long, surtout vers la fin ».

Le moment est enfin venu de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de cette thèse et de manière plus générale à l'ensemble de mon parcours.

Pour commencer, je remercie chaleureusement mes directrices de thèse, les Pr. Sandrine Rossi et Dr. Nadège Roche-Labarbe de m'avoir accompagnée durant ces quatre années de thèse et d'avoir cru en moi pour ce projet. Merci de m'avoir poussée dans mes retranchements lorsqu'il le fallait mais également de m'avoir soutenue dans les périodes de doute. Sandrine, nous avons appris à nous découvrir durant cette thèse... Je n'oublierai pas nos échanges passionnants sur l'attention et les fonctions exécutives, qui m'ont poussée à aller encore plus loin dans mes réflexions et nos deux déplacements en congrès à Lille et à Paris. Merci d'avoir encouragé une rigueur sans faille, une rigueur qui peut faire grogner, mais qui fait toute la différence. Je connais désormais par cœur tous les raccourcis claviers associés aux majuscules avec accent et j'entends encore une voix me dire « la constance des termes Marie ». Alors, c'est avec constance que je répète ce merci pour cette jolie aventure. Nadège, l'aventure a commencé un peu plus tôt en master 2, et s'est poursuivie avec ce projet de thèse, qui correspondait parfaitement à mon intérêt pour le dépistage précoce des TND. Un projet ambitieux, dont je n'avais peut-être pas initialement saisi toute la mesure (E-Prime, NetStation et Matlab). Je n'oublierai jamais le premier déplacement en tout début de thèse, à Grenade dans le labo de Charo Rueda, un vrai beau moment de partage et de science. Merci pour ta franchise, ta bonne humeur, ton humour et nos conversations équestres, qui ont considérablement soutenu cette thèse.

Je tiens également à remercier les Dr. Jean-Philippe Lachaux et Dr. Julie Bertels, qui me font l'honneur de rapporter ce travail de thèse, ainsi que les Pr. Corentin Gonthier et Dr. Hervé Segond, d'avoir accepté de l'examiner.

À tous les enfants qui ont participé aux études, cette thèse c'est aussi la vôtre. Un remerciement tout particulier à l'une de mes premières participantes, Mlle Pimp'. Ma gratitude va également aux écoles maternelles qui m'ont accueillie pour les passations, dans des contextes sanitaires parfois délicats : Mmes Plunet et Lehérisser pour l'école Paul Gernez, Mr Bacquet pour l'école Authie Sud, Mme Dolet pour l'école Clos Herbert et Mme Lerogeron pour l'école Sainte Marie Madeleine à Barfleur (un retour aux sources, là où tout a commencé il y a 25 ans...).

Merci à la Région Normandie d'avoir financé ce projet de thèse durant trois années et demi. Mes pensées vont également à l'ensemble des membres de l'école doctorale 556 Homme Société Risque Territoire, ainsi que le personnel de la Maison de la Recherche en Sciences Humaines.

Je remercie les membres de mon comité de suivi de thèse, le Pr. Marc Zabalia et le Dr. Christelle Jozet. Merci pour votre accompagnement et votre soutien, notamment sur cette dernière année, où vous avez su regonfler cette estime de soi qui était en train de s'essouffler.

Je remercie les membres du Laboratoire de Psychologie Caen Normandie et sa directrice, Cécile Sénémeaud, de m'avoir accueillie durant ces quatre années, et offert un environnement de travail propice à la réalisation d'une thèse. Merci d'avoir valorisé au sein du laboratoire les actions de médiation scientifique, qui ont marqué mon parcours doctoral.

Je remercie également le Laboratoire COMETE-INSERM et son directeur, Thomas Freret, de m'avoir accueillie dans ses locaux pour réaliser l'ensemble des passations expérimentales de cette thèse. J'ai une pensée toute particulière pour Eve, merci pour ta bienveillance. Daniel, dois-je compter le nombre de fois où je suis venue demander un dépannage informatique ? Une pensée pour les collègues doctorants et post-doctorants avec lesquels j'ai pu échanger et partager quelques repas : Emma, Marc, Ivan, Cécilia, Olga, Stéphane.

À mes deux compères de la team DECODE, Anne-Lise et Victoria, cette aventure je l'ai partagée avec vous. Plus d'une centaine de passations, quelques week-ends sacrifiés pour nos petits participants et des miracles accomplis pour que quasiment tous tolèrent les filets EEG ! Anne-Lise, je te dois pour beaucoup dans la conception du protocole tactile ainsi que dans l'élaboration des routines EEG Matlab. Nous avons été complémentaires afin de sortir respectivement de nos zones proximales de développement. Je te souhaite le meilleur pour la suite de ton parcours. Victoria, il va m'être difficile de résumer en quelques lignes toute l'admiration et l'amitié que j'ai à ton égard. Ton parcours est source d'inspiration, et je salue l'excellente clinicienne et chercheuse que tu es. Merci pour ton soutien, qui m'a permis de prendre du recul lorsque cela était nécessaire, et d'avoir réceptionné mes pleurs, mes colères mais aussi mes rires. Un merci en appelle un autre, merci de m'avoir offert un lieu calme de rédaction durant l'été, et à Curly d'avoir supervisé son avancée.

À mes valeureux collègues présents et passés de la 403, que dis-je... désormais la 4sous3, il va m'être difficile d'être concise. Vous n'êtes pas que des collègues, vous êtes pour beaucoup devenus de vrais amis. Je vais commencer par mon binôme, SimSim, désormais docteur mais pas pédiatre (j'espère que tu auras la référence). C'était un bonheur de partager tous ces moments de rire (et chansons) à tes côtés. Les coups de prune et les mots en zette ont entretenu ta petite artère. L'aventure a été plus belle à tes côtés et plus facile à traverser, notamment cette dernière année, marquée de transitions professionnelles. Mais quand on appelle Simon, n'y aurait-il pas Marion ? Reine des astuces de pauvre (mais aussi de la neuropsychologie), tu as apporté beaucoup de questions naïves, mais surtout tu as été d'un vrai soutien durant cette thèse. Je salue également toutes ces conversations qui nous font réaliser que nous serons toujours pris au dépourvu... Les plus jeunes, mais la relève sans aucun doute : Petit Balbouchon et Maëlle. Petit Balbouchon, je n'oublierai jamais à qui l'on doit remettre le badge chaque mois et toute l'insolence dont tu fais preuve au quotidien, qui aime bien châtie bien ! Tu t'es vite imprégnée de l'ambiance à une période qui n'était pas des plus simples, tu as su apporter ta personnalité et tes pêches au thon (parfois même des bonnes profiteroles) ... Maëlle, dernière arrivée dans la famille qui rend triste, quelle belle rencontre ! Merci d'avoir pris soin de penser notre nouvel espace, et le mot soin prend tout son sens. Je salue également tes qualités en matière de montages photo douteux, les salsifis te remercient. Merci à toutes les deux d'avoir supporté mes ronchonnements de dernière heure et d'avoir rigolé à tous ces mots isolés qui

complétaient inconsciemment vos conversations... Je vous souhaite tout le meilleur pour la fin de vos thèses. Après les plus jeunes, ~~les moins jeunes~~... Pauline, tu étais déjà bien lancée sur le chemin de la thèse lorsque j'ai commencé et j'ai été frappée par ton dynamisme, ainsi que la force et la persévérance dont tu fais preuve au quotidien. Nos conversations passionnantes sur les interactions entre attention, fonctions exécutives et métacognition, appellent probablement de belles collaborations ultérieures dans nos pratiques professionnelles. Je te remercie pour ta présence dans les moments les plus joyeux et les plus difficiles. Nous sommes de ferventes ambassadrices du Cotentin, et oui, nous sommes de la Manche, avec ses expressions pouet-pouet. Aucune statistique n'a été menée à ce sujet, mais la Manche regorge de grands crus, en particulier Barfleur. Sandrine, une merveilleuse rencontre qui relève sûrement d'une inquiétante étrangeté. Nous partageons un sens inné pour les onomatopées en tout genre notamment les « mmmh, aaah, oohh » et tu m'as montré la voie (voix ?) vers les décompensations cotées E. Le mystère de la grande delle restera non divulgué, mais nous pouvons divaguer durant les marches du jeudi soir avec Guégué (et parfois fouiller les poubelles en quête d'un ordinateur) ! Entre ronchonnades et bonne humeur, c'est avec toi qu'a commencé cette fameuse histoire de bus. Buena vista social club, une pensée pour Soso, Manon et Coco qui ont pleinement investi la 403 durant son âge d'or. Il y en a une dans cet espace-temps qui traversera toutes les époques, c'est notre super Charlotte ! Merci pour ta douceur et ta bienveillance, tu as accompagné bon nombre de mes cafés matinaux. Merci à chacun de vous pour les personnes extraordinaires que vous êtes. Je tenais tout de même à vous dire que j'ai mangé beaucoup de lentilles, mais ma vue ne s'est pas améliorée (et mon second degré en fin de thèse non plus). Une pensée aussi pour Nicolas, que je remercie pour ses conseils et sa bienveillance, je te souhaite le meilleur dans ta carrière d'enseignant-chercheur. Une pensée également pour Odran qui va commencer l'aventure de thèse avec Sandrine et Céline, que la force soit avec toi !

Je remercie également les professionnels que j'ai croisé au cours de ma formation et dans mes débuts en tant que psychologue en institution. Je vais commencer par un profond remerciement à Valérie Retaillaud, qui m'a accueillie en stage en master 1 et qui continue de suivre de près mon parcours professionnel. J'ai une sincère admiration pour la clinicienne que tu es, ton savoir, ton énergie et ton investissement ont fortement résonné en moi.

Je remercie l'ensemble de l'équipe de l'ITEP et du SESSAD Vallée de l'Odon qui m'a accueillie en tant que psychologue à temps partiel durant quelques mois, de mars à juillet 2023, à la fin de mon contrat doctoral. Cette expérience m'a rappelée pourquoi je faisais ce travail de recherche à un moment où je n'y mettais plus de sens. J'ai été particulièrement touchée de la reconnaissance que vous avez témoigné vis-à-vis de mon travail auprès des jeunes et des équipes. Je remercie Clémence Brière, de la confiance qu'elle m'a accordée pour assurer sa fonction durant son absence. J'ai une pensée spéciale pour Sophie Gendreau et Kevin Damas, mes collègues psychologues du pôle thérapeutique, l'aventure fut brève mais intense. Nous avons partagé de forts moments, et de jolis liens amicaux se sont tissés.

Mon âme de clinicienne m'a emportée vers de nouveaux horizons, et j'ai rejoint en mai 2023 l'Unité Équinoxe de l'IME L'Espoir à Bayeux (14). J'ai découvert l'accompagnement de

jeunes présentant un autisme sévère, selon une approche intégrative. Vous m'avez rapidement accordé votre confiance et une place singulière au sein de l'équipe pluridisciplinaire et je tiens à remercier chacun d'entre vous.

La trajectoire développementale de cette thèse a évolué de façon singulière et quelques petites embûches auraient pu me dévier du chemin ... À ce fichu covid, qui a retardé de près d'un an les inclusions d'enfants en écoles... À ce très cher voleur d'ordinateur qui a décidé en début de rédaction de thèse en octobre 2022, de m'ôter mes premiers chapitres théoriques et de tester ma résilience... Ces facteurs de risque n'ont pas fait le poids face aux facteurs de protection qui étaient eux, bien nombreux.

Merci à mes amies les plus proches, de m'avoir soutenue tout au long de cette aventure et pour certaines, depuis bien plus longtemps ! Maureen, je vais commencer par toi, une amitié qui dure depuis plus de 20 ans. Même si la distance nous a éloigné pour des raisons professionnelles, nous n'avons jamais manqué une occasion de nous retrouver ni de nous soutenir dans les moments les plus difficiles. Louise, il en est de même pour nous, depuis la plus petite enfance, nous avons un tas de souvenirs en commun (de la maternelle à notre diplôme de master en psychologie du développement, c'est pour dire...). Même si nous avons grandi et que nos vies ont changé, je sais que je peux compter sur vous.

Pauline et Marie, c'était une évidence de vous rencontrer, vous avez été mes rayons de soleil durant ces deux dernières années de thèse. Merci pour votre soutien et vos tendres attentions du samedi soir !

Emilie, ma source d'inspiration équestre, tu es devenue une véritable amie au fil des années. Une amie aussi déterminée que moi à croire en ses projets !

C'est peu commun, mais il y a deux êtres que je souhaite remercier et qui sont mes forces vives depuis plusieurs années, Action et Enjoy (Ponpon pour les plus intimes).

Des remerciements sont de mise pour mes parents qui m'ont toujours soutenue et encouragée dans mes projets. Maman, merci pour tes petites attentions, ta douceur et ta force de caractère. Papa, je salue ton courage et ta force, rien ne t'arrête même dans les tourments. Merci pour toutes ces belles valeurs que vous m'avez transmises. Mamie, je suis sûre que tu es très fière de dire que ta petite fille a fait une thèse, tu as toujours été à l'écoute durant nos cafés du dimanche matin, et je suis sûre que Pépère aurait été très fier de fêter l'aboutissement de ce travail.

Enfin, un grand merci à celui qui partage ma vie depuis plus de neuf années maintenant, le temps d'une licence, d'un master et d'une thèse, ce n'est pas rien quand même ! Tu as supporté, je dirai même subi, mes sautes d'humeur et mes crises d'agitation et pourtant, tu m'as encouragée à ne jamais rien lâcher. Cela n'a pas toujours été simple, nous n'avons pas choisi des métiers hautement compatibles mais nous avons réussi le défi haut la main ! Je crois que désormais la vie peut nous permettre de construire des projets communs.

Merci à toutes et à tous d'avoir contribué, à votre façon, à l'aboutissement de ce travail.

RÉSUMÉ

L'attention exécutive, composante du modèle des réseaux de l'attention de Posner, est une compétence cognitive fondamentale qui se développe considérablement durant la période préscolaire. C'est aussi durant cette période que des différences interindividuelles d'attention exécutive peuvent déjà prédire la trajectoire développementale ultérieure. Des troubles de l'attention exécutive sont par ailleurs comorbides à des atypies sensorielles dans la symptomatologie des troubles neurodéveloppementaux. Selon l'approche neuroconstructiviste, les premières expériences sensorielles sont aux fondements du développement cognitif. L'apprentissage de ces expériences est permis par la prédiction sensorielle, capacité qui serait à la base du développement cognitif. Le sens du toucher est le plus précoce et fondamental, cependant aucune étude n'a à ce jour exploré le potentiel de la prédiction sensorielle dans la modalité tactile chez de jeunes enfants comme marqueur de neurodéveloppement atypique. L'objectif de ce travail de thèse est d'explorer les liens entre attention exécutive et traitement sensoriel tactile chez des enfants d'âge préscolaire. Dans une étude préliminaire menée auprès de 70 enfants âgés de 4 ans à 5 ans 11 mois, nous avons mis en évidence un lien entre le score de traitement sensoriel tactile, mesuré par le questionnaire du Profil Sensoriel de Dunn, et le score composite exécutif global de la BRIEF-P. Pour explorer ultérieurement ce lien au niveau cérébral auprès de notre population d'étude, nous avons adapté une tâche informatisée d'attention exécutive, nommée la *Preschool-ANT*, compatible avec des mesures en EEG. Nous avons étudié la validité de cette tâche en comparant les performances comportementales des enfants de l'étude préliminaire avec celles recueillies dans deux autres tâches évaluant le contrôle inhibiteur : l'HTKS et le Stroop-animaux. Les performances des enfants à la *Preschool-ANT* sont associées aux performances obtenues dans les deux autres tâches et confortent l'utilisation de notre outil comme mesure de l'attention exécutive à l'âge préscolaire. Dans une seconde étude menée auprès d'un nouvel échantillon d'enfants, âgés de 4 ans à 4 ans 11 mois, nous avons mis à profit ce nouvel outil pour évaluer en EEG les liens entre traitement sensoriel tactile et attention exécutive. Nous avons conçu un paradigme vibrotactile de type *oddball*-omission pour mesurer la prédiction sensorielle et son mécanisme associé, la suppression par répétition. La suppression par répétition tactile en région fronto-centrale est corrélée à la différence des réponses neurales positives tardives entre les conditions congruentes et incongruentes à la *Preschool-ANT*. De plus, la suppression par répétition tactile en région somatosensorielle est corrélée à l'inhibition et la planification en situation de vie quotidienne (BRIEF-P). Enfin, la détection de stimuli tactiles déviants, montrait des liens à la fois avec la différence des réponses neurales positives tardives de la *Preschool-ANT* et le contrôle émotionnel en situation de vie quotidienne (BRIEF-P). Ce travail de thèse argumente en faveur de liens entre l'efficacité de l'attention exécutive et du traitement sensoriel tactile tant sur les aspects comportementaux que cérébraux. De plus, il souligne la pertinence d'étudier, dès le plus jeune âge, la qualité du traitement sensoriel tactile pour comprendre l'évolution vers des trajectoires développementales atypiques. Enfin, il offre de nouvelles perspectives pour les chercheurs mais également les professionnels dans le champ de la santé et de l'éducation pour concevoir de nouveaux outils d'évaluation et promouvoir des interventions précoces ciblées sur les troubles sensoriels, pour conjointement réduire l'impact des troubles attentionnels.

Mots clés : *Attention exécutive, traitement sensoriel tactile, prédiction sensorielle, neuroconstructivisme, troubles neurodéveloppementaux.*

ABSTRACT

Executive attention, as conceived by Posner's attention network model, is a fundamental cognitive skill that develops rapidly during the preschool period. It is also during this period that interindividual differences in executive attention can already predict later developmental trajectories. Executive attention disorders are also common in neurodevelopmental disorders in conjunction with sensory atypicalities. According to the neuroconstructivist framework, early sensory experiences form the foundation of cognitive development. Learning from these experiences is facilitated by sensory prediction, a competence that is believed to underlie cognitive development. The sense of touch is the earliest and most fundamental, however, to date, no study has explored the potential of sensory prediction in the tactile modality in young children as a marker of atypical neurodevelopment. The aim of this thesis work is to explore the links between executive attention and tactile sensory processing in preschool-aged children. In a preliminary study conducted with 70 children aged 4 to 5 years and 11 months, we identified a link between tactile sensory processing score, measured using the Dunn Sensory Profile questionnaire, and the BRIEF-P overall executive composite score. To further investigate this link at the neural level within our study population, we adapted a computerized executive attention task, the *Preschool-ANT*, compatible with EEG measurements. We assessed the validity of this task by comparing the behavioral performance of children from the preliminary study with those obtained in two other tasks assessing inhibitory control: the HTKS and the Stroop-animals. Children's performance on the *Preschool-ANT* is associated with their performance in the other two tasks, supporting the use of our tool as a measure of executive attention in the preschool age group. In a second study conducted with a new sample of children aged 4 to 4 years and 11 months, we employed this new tool to assess the links between tactile sensory processing and executive attention using EEG. We designed a vibrotactile omission-oddball paradigm to measure sensory prediction and its associated mechanism, repetition suppression. Tactile repetition suppression in the fronto-central region is correlated with the difference in late positive components obtained in the fronto-central region between congruent and incongruent conditions at the *Preschool-ANT*. Furthermore, tactile repetition suppression in the somatosensory cortex was related to inhibition and planning in everyday life situations (BRIEF-P). Finally, the detection of deviant tactile stimuli showed links with both the difference in late positive components at the *Preschool-ANT* and emotional control in everyday life situations (BRIEF-P). This doctoral dissertation offers a compelling case for the interconnectedness between the efficiency of executive attention and tactile sensory processing, in terms of behavioral and neurological aspects. Furthermore, it emphasizes the significance of investigating the quality of tactile sensory processing from a young age to gain insights into the development of atypical developmental trajectories. Finally, it offers new perspectives for researchers as well as professionals in the fields of health and education to design new assessment tools and promote early interventions targeted at sensory disorders, with the aim of concurrently reducing the impact of attentional disorders.

Keywords: *executive attention, tactile sensory processing, sensory prediction, neuroconstructivism, neurodevelopmental disorders*

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Liste des abréviations | I |
| Liste des tableaux | III |
| Liste des figures | V |
| Introduction générale..... | 2 |
| Chapitre 1 – L’attention exécutive : un construit au cœur de la cognition..... | 5 |
| 1. Introduction | 5 |
| 2. Le modèle des réseaux attentionnels | 7 |
| 2.1. L’attention d’alerte | 8 |
| 2.2. L’attention d’orientation..... | 9 |
| 2.3. L’attention exécutive | 10 |
| 3. Quelle(s) fonction(s) pour l’attention exécutive au sein de la cognition ?..... | 12 |
| 3.1. Attention exécutive et contrôle cognitif | 12 |
| 3.2. Du contrôle cognitif à l’auto-régulation | 19 |
| 3.3. Vers une modélisation de ces construits en interaction avec l’attention exécutive... | 21 |
| 4. Développement de l’attention exécutive | 23 |
| 4.1. Les précurseurs de l’attention exécutive | 24 |
| 4.2. Développement de l’attention exécutive chez les enfants d’âge préscolaire..... | 28 |
| 4.3. L’attention exécutive : un pilier pour les apprentissages scolaires | 31 |
| Résumé du Chapitre 1..... | 36 |
| Chapitre 2 - L’attention exécutive au sein des troubles neurodéveloppementaux... | 38 |
| 1. Introduction | 38 |
| 2. L’attention exécutive : une composante commune des troubles neurodéveloppementaux | 39 |
| 2.1. Attention exécutive et trouble déficitaire de l’attention avec ou sans hyperactivité . | 39 |
| 2.2. Attention exécutive et trouble du spectre de l’autisme..... | 44 |
| 2.3. Attention exécutive et troubles des apprentissages | 51 |

| | | |
|------|---|------------|
| 3. | Facteurs de risque de trajectoires développementales atypiques | 54 |
| 3.1. | La prématurité : un facteur de risque à part entière | 55 |
| 3.2. | Prématurité et troubles neurodéveloppementaux | 57 |
| 3.3. | Prématurité et syndrome dysexécutif | 59 |
| 4. | Les enjeux du dépistage précoce des troubles neurodéveloppementaux | 62 |
| 4.1. | Le dépistage précoce des TND en France : état des lieux | 63 |
| 4.2. | Accompagner les troubles de l'attention dès le plus jeune âge | 65 |
| 4.3. | L'attention exécutive : un marqueur cross-syndromique des troubles neurodéveloppementaux..... | 67 |
| | Résumé du chapitre 2..... | 71 |
| | Chapitre 3 - Les fondements sensoriels du développement cognitif précoce..... | 73 |
| 1. | Introduction | 73 |
| 2. | L'approche neuroconstructiviste du développement cognitif | 74 |
| 2.1. | Du modèle piagétien à l'approche neuroconstructiviste pour décrire le développement cognitif précoce | 74 |
| 2.2. | Principes fondamentaux de l'approche neuroconstructiviste | 76 |
| 3. | Le développement sensoriel : support du développement cognitif | 79 |
| 3.1. | Le toucher : un sens fondamental pour le développement perceptif et cognitif..... | 80 |
| 3.2. | Des profils sensoriels atypiques affectant la modalité tactile dans les TND..... | 85 |
| 3.3. | Identification de marqueurs neuronaux liés à un traitement sensoriel atypique..... | 88 |
| 4. | La prédiction sensorielle : un mécanisme clé au cœur de la perception et la cognition .. | 90 |
| 4.1. | La théorie du codage prédictif pour comprendre le développement cognitif précoce | 91 |
| 4.2. | Prédiction sensorielle et attention exécutive | 94 |
| 4.3. | Prédiction sensorielle dans la modalité tactile : un marqueur neurodéveloppemental de l'attention exécutive ? | 98 |
| | Résumé du chapitre 3..... | 101 |
| | Chapitre 4 - Contributions expérimentales | 103 |

| | |
|---|------------|
| 1. Problématique et objectifs | 103 |
| 2. Étude 1A - Attention exécutive et traitement sensoriel tactile en situation de vie quotidienne | 104 |
| 2.1. Contexte et objectifs | 104 |
| 2.2. Méthode | 105 |
| 2.3. Résultats..... | 110 |
| 2.4. Discussion..... | 112 |
| 3. Étude 1B - Conception d'une tâche pour l'évaluation de l'attention exécutive chez l'enfant d'âge préscolaire | 114 |
| 3.1. Contexte et objectifs | 114 |
| 3.2. Méthode | 115 |
| 3.3. Résultats..... | 121 |
| 3.4. Discussion..... | 125 |
| 4. Étude 2 - Liens entre marqueurs électrophysiologiques de l'attention exécutive et du traitement sensoriel tactile..... | 127 |
| 4.1. Contexte et objectifs | 127 |
| 4.2. Méthode | 130 |
| 4.3. Résultats..... | 137 |
| 4.4. Discussion..... | 153 |
| Résumé du chapitre 4..... | 157 |
| Chapitre 5 – Discussion générale | 159 |
| Conclusion..... | 165 |
| Références bibliographiques | 166 |
| Liste des annexes..... | 205 |
| Publications et communications résultant du travail de thèse..... | 238 |
| Activités connexes au travail de thèse..... | 241 |

Liste des abréviations

AG – Âge Gestationnel

AGc – Âge Gestationnel corrigé

ANT – *Attention Network Task*

ASI – *Ayres Sensory Integration*

BRIEF-P – Inventaire d'évaluation des fonctions exécutives version préscolaire

CBCL - *Child Behavior Checklist*

CRTLA - Centre de Référence des Troubles du Langage et des Apprentissages

DCCS – *Dimensional Change Card Sorting task*

DSDEN – Direction des Services Départementaux de l'Éducation Nationale

ECITT – *Early Childhood Inhibitory Touchscreen Task*

EEG – Électroencéphalographie

fNIRS - spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle

HIV – Hémorragie Intra Ventriculaire

HTKS – *Head Toes Knees Shoulders task*

IRMf – Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

LPC – Composantes positives tardives (*Late Positive Components*)

PE – Potentiels évoqués

PSD – Profil Sensoriel de Dunn

ROI – Régions d'intérêt (*Regions Of Interest*)

TDA – Trouble Des Apprentissages

TDA/H – Trouble Déficitaire de l'Attention avec ou sans Hyperactivité

TND – Troubles NeuroDéveloppementaux

TSA – Trouble du Spectre de l'Autisme

SA – Semaines d'Aménorrhée

SAF – Syndrome d'Alcoolisation Fœtale

SAS – Système Attentionnel Superviseur

SEP – Potentiels évoqués somatosensoriels (*Somatosensory Evoked Potentials*)

SR – Suppression par Répétition

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1. Distinction des différents degrés de prématurité..... | 56 |
| Tableau 2. Caractéristiques développementales des 63 enfants inclus dans l'étude..... | 106 |
| Tableau 3. Résultats obtenus aux hétéro-questionnaires (BRIEF-P et PSD)..... | 110 |
| Tableau 4. Tableau récapitulatif des corrélations entre les hétéro-questionnaires : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules surlignées en jaune correspondent aux hypothèses de l'étude. | 112 |
| Tableau 5. Description des performances obtenues dans la tâche <i>Preschool-ANT</i> | 122 |
| Tableau 6. Description des performances obtenues dans les tâches HTKS et Stroop. | 122 |
| Tableau 7. Tableau récapitulatif des corrélations entre les performances obtenues dans les trois tâches : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules surlignées en jaune correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude..... | 124 |
| Tableau 8. Description des réponses aux BRIEF-P et PSD, et des performances dans les tâches HTKS et Stroop. | 138 |
| Tableau 9. Description des performances obtenues à la <i>Preschool-ANT</i> | 139 |
| Tableau 10. Tableau récapitulatif des corrélations entre les hétéro-questionnaires : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules en jaune correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude. | 140 |
| Tableau 11. Tableau récapitulatif des corrélations entre les performances dans les trois tâches : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules en jaune correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude. | 141 |
| Tableau 12. Tableau récapitulatif des corrélations entre corrélats neurophysiologiques de la <i>Preschool-ANT</i> et du protocole <i>oddball</i> -omission tactile : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées | |

sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules en jaunes correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude. 149

Tableau 13. Tableau récapitulatif des corrélations de Spearman entre les corrélats neurophysiologiques de l'attention exécutive et les scores obtenus au PSD : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules jaunes correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude. 151

Tableau 14. Tableau récapitulatif des corrélations de Spearman entre les corrélats neurophysiologiques du traitement tactile et l'attention exécutive en contexte : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules jaunes correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude. 152

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Procédure expérimentale de l'ANT, traduit d'après Fan et al. (2002). | 7 |
| Figure 2. A- Anatomie des trois réseaux attentionnels : l'attention d'alerte, l'attention d'orientation et l'attention exécutive (d'après Posner et Rothbart, 2007). B- Grands réseaux impliqués dans l'attention d'orientation. Figures traduites en français par Carole Fumat au sein de l'ouvrage Neuropsychologie et troubles des apprentissages, Mazeau et al. (2021). | 10 |
| Figure 3. Potentiels évoqués cérébraux associés à l'attention exécutive, d'après Rueda et al. (2004). | 11 |
| Figure 4. Modèle des fonctions exécutives, traduit en français d'après Adèle Diamond (2013). | 14 |
| Figure 5. Modèle intégratif de l'autorégulation présenté par Bailey et Jones ; les composantes en bleu sont associées au domaine cognitif, les composantes en rouge sont associées au domaine émotionnel et les composantes en violet sont employées dans les deux domaines. Traduit en français d'après Jones, S. M., Bailey, R., Barnes, S. P., & Partee, A. 2016. OPRE Report # 2016–88, Washington, DC: Office of Planning, Research and Evaluation, Administration for Children and Families, U.S. Department of Health and Human Services. (2016)..... | 20 |
| Figure 6. Proposition de modèle théorique autour du construit d'attention exécutive en lien avec le contrôle cognitif et l'autorégulation..... | 22 |
| Figure 7. Les trois grands réseaux neuronaux impliqués dans la mobilisation des capacités cognitives : le réseau de mode par défaut, le réseau de la saillance et le réseau exécutif central. Adapté de Menon (2015)..... | 24 |
| Figure 8. Protocole ECITT, adapté de Holmboe et al., (2021). | 27 |
| Figure 9. Protocole Child-ANT, adapté de Rueda et al., (2004). | 29 |
| Figure 10. Tracé des potentiels évoqués cérébraux pour les essais congruents et incongruents en fonction du groupe expérimental, depuis la session pré-tests jusqu'aux deux post-tests. Les graphiques en haut mettent en évidence des électrodes en région frontales antérieures alors que les graphiques en bas montrent des canaux dans des régions fronto-postérieures (électrodes Fcz/Cz). Les zones grisées mettent en évidence des différences significatives entre les conditions congruentes et incongruentes..... | 33 |
| Figure 11. Schéma de l'aversion du délai d'après Sonuga-Barke, traduit par Gaillac et Vera (2016). | 43 |

| | |
|--|-----|
| Figure 12. Comparaison des performances dans des tâches exécutives chez des sujets TSA, TDA/H et syndrome de la Tourette versus des sujets typiques. Traduit et adapté d'après les travaux menés par Ozonoff et Jensen (1999). | 48 |
| Figure 13. Données provenant de l'étude menée auprès de sujets TSA adultes (Fan et al., 2012) Activations cérébrales chez les sujets contrôles (A) versus TSA (B) ; Pourcentage d'erreurs en condition congruente versus incongruente en fonction du groupe (C) ; Temps de réaction en condition congruente versus incongruente en fonction du groupe ; Régressions linéaires entre le pourcentage d'erreur concernant le conflit cognitif et les activations du cortex cingulaire antérieur (E) ; Régressions linéaires entre l'effet de conflit exprimé via le temps de réaction et les activations du cortex cingulaire antérieur (F). | 50 |
| Figure 14. Hétérogénéité des groupes sur les mesures des fonctions exécutives. Les performances sont considérées comme altérées lorsqu'elles sont inférieures à 1,5 écart type de la moyenne basé sur les performances d'un groupe témoin apparié en âge. Traduction d'après l'article de Al Dahhan et al. (2022). | 52 |
| Figure 15. Pourcentage estimé de naissances prématurées dans le monde en 2014 d'après les données de l'OMS (Chawanpaiboon et al., 2018). | 56 |
| Figure 16. Prévalence de TND à l'âge de 11 ans au sein d'une cohorte de nouveau-nés prématurés (EPICure) traduit en français de l'article de Johnson et Marlow (2011). | 57 |
| Figure 17. Suivi neurodéveloppemental à 5 ans des nouveau-nés prématurés provenant de la cohorte EPIPAGE-2, traduit d'après l'article de Pierrat et al. (2021). | 59 |
| Figure 18. Principes de l'approche neuroconstructiviste du développement cognitif, traduit et adapté de Rinaldi et Karmiloff-Smith (2017). | 77 |
| Figure 19. Répartition des récepteurs tactiles cutanés et les stimuli auxquels ils réagissent. Adapté de G.C. Tortora et B. Derrickson, <i>Éléments d'anatomie et de physiologie</i> , adaptation française de L. Martin et M. Forest, Montréal, Editions du nouveau pédagogique, 2009, p 290. | 81 |
| Figure 20. Organisation somatotopique du cortex somesthésique primaire chez l'homme et illustration de l'homonculus. Issu de Nadeau et al., (2006). <i>Neurosciences médicales</i> , ELSEVIER. | 82 |
| Figure 21. Synthèse de notre proposition théorique (Anquetil et al., 2023). | 99 |
| Figure 22. Protocole expérimental de la tâche attentionnelle tactile traduit à partir de Weiss et al. (2018). | 100 |
| Figure 23. Répartition des items du Profil Sensoriel de Dunn dans les 14 sections et les 3 thèmes (ECPA, Pearson). | 109 |

| | |
|---|-----|
| Figure 24. Relation entre le score composite exécutif global BRIEF-P et le score de traitement de l'information sensorielle tactile au Profil Sensoriel de Dunn. Les profils d'enfants présentant des trajectoires développementales à risque sont identifiés en orange. | 111 |
| Figure 25. Stimuli animaux présentés dans les blocs expérimentaux de la <i>Preschool-ANT</i> | 117 |
| Figure 26. Protocole expérimental de la <i>Preschool-ANT</i> | 118 |
| Figure 27. Illustration de la passation de la tâche HTKS. | 119 |
| Figure 28. Extrait des items présentés sur la planche incongruente de la tâche de Stroop. .. | 121 |
| Figure 29. Temps de réaction médians à la <i>Preschool-ANT</i> pour les conditions congruentes et incongruentes. | 123 |
| Figure 30. Rangs de corrélation entre les temps de réaction médians en condition incongruente en fonction des temps de réaction médians en condition incongruente à la <i>Preschool-ANT</i> | 123 |
| Figure 31. Description des effectifs au sein des différentes mesures expérimentales de notre étude. | 131 |
| Figure 32. Électrodes formant la ROI en région fronto-centrale. | 134 |
| Figure 33. Exemples de calcul d'amplitude d'une réponse N2 en condition incongruente (à gauche) et de LPC en condition congruente (à droite) dans les fenêtres temporelles d'intérêt respectives. | 134 |
| Figure 34. Matrice vibratoire développée par Caylar SAS. | 135 |
| Figure 35. Installation d'un participant pour le protocole <i>oddball</i> -omission. | 135 |
| Figure 36. Protocole expérimental <i>oddball</i> -omission. | 135 |
| Figure 37. Électrodes utilisées pour déterminer les deux ROIs, la région somatosensorielle en bleu et la région fronto-centrale en rouge. | 136 |
| Figure 38. Exemple pour la suppression par répétition en région somatosensorielle, de la latence et d'un pic d'amplitude sur la courbe de mismatch. | 137 |
| Figure 39. Moyennes des temps de réaction médians à la <i>Preschool-ANT</i> entre les conditions congruentes et incongruentes. | 140 |
| Figure 40. Moyenne des potentiels évoqués pour les conditions congruentes et incongruentes en région fronto-centrale (à gauche) et moyenne des potentiels évoqués pour les conditions congruentes et incongruentes en fonction des indices valides et invalides en région fronto-centrale (à droite). | 142 |
| Figure 41. Amplitudes moyennes de la réponse N2 pour les conditions congruentes et incongruentes. | 143 |
| Figure 42. Amplitudes moyennes de la réponse LPC pour les conditions congruentes et incongruentes. | 143 |

| | |
|---|-----|
| Figure 43. Moyennes des potentiels évoqués entre le début de séquence tactile (familiarisation) et la fin de séquence tactile (condition contrôle) en région somatosensorielle (gauche) et en région fronto-centrale (droite). | 144 |
| Figure 44. Amplitudes moyennes de la réponse P300 pour la condition familiarisation et la condition contrôle en région fronto-centrale. | 144 |
| Figure 45. Amplitudes moyennes de la réponse N140 pour la condition familiarisation et la condition contrôle en région somatosensorielle. | 144 |
| Figure 46. Moyenne des potentiels évoqués par les stimuli standards et les stimuli déviants en région somatosensorielle (gauche) et en région fronto-centrale (droite). | 145 |
| Figure 47. Amplitudes moyennes de la réponse N140 pour la condition stimuli standards et la condition stimuli déviants en région somatosensorielle. | 145 |
| Figure 48. Amplitudes moyennes de la réponse P300 pour la condition stimuli standards et la condition stimuli déviants en région fronto-centrale. | 145 |
| Figure 49. Moyenne des potentiels évoqués par les conditions stimuli standards et les stimuli post-omission en région somatosensorielle (gauche) et en région fronto-centrale (droite). .. | 146 |
| Figure 50. Amplitudes moyennes de la réponse N140 pour la condition stimuli standards et la condition post-omissions en région somatosensorielle. | 146 |
| Figure 51. Amplitudes moyennes de la réponse P300 pour la condition stimuli standards et la condition stimuli déviants en région fronto-centrale. | 146 |
| Figure 52. Relation entre la réponse au conflit des LPC à la <i>Preschool-ANT</i> et la suppression par répétition de la P300 au protocole tactile. | 148 |
| Figure 53. Relation entre la réponse au conflit des LPC à la <i>Preschool-ANT</i> et la mismatch de la N140 liée aux post-omissions tactiles. | 149 |
| Figure 54. Relation entre suppression par répétition de la réponse N140 au protocole tactile et score composite exécutif global de la BRIEF-P. | 150 |
| Figure 55. Relation entre mismatch de la réponse N140 aux stimuli tactiles déviants et l'échelle de contrôle émotionnel de la BRIEF-P. | 151 |

Introduction générale

Introduction générale

Gérer efficacement l'allocation de ses ressources attentionnelles est crucial à tous les âges de la vie pour la plupart de nos actions. Ainsi, résister à des distractions dans un environnement surchargé de stimulations sensorielles demeure un véritable enjeu de société et de santé publique. Dès le plus jeune âge, une pleine efficacité de l'attention est associée à un développement cognitif, social et affectif équilibré. Parmi les modèles théoriques de l'attention, le modèle des réseaux attentionnels proposé par Posner (1990) distingue trois fonctions attentionnelles : l'attention d'alerte, l'attention d'orientation et l'attention exécutive, associées à des réseaux cérébraux spécifiques. Parmi ces fonctions, l'attention exécutive joue un rôle essentiel dans le contrôle cognitif, permettant à l'individu de gérer efficacement ses pensées et ses comportements. Elle se développe considérablement durant la période préscolaire, période au cours de laquelle sont également identifiées les premières manifestations comportementales de trajectoires développementales atypiques.

En France, depuis la loi de 2005 pour l'égalité des droits et des chances (LOI n° 2005-102 du 11 février 2005), la prise en charge des enfants présentant une vulnérabilité scolaire est un enjeu sociétal majeur. Un des principaux leviers liant la recherche et la clinique sur les troubles neurodéveloppementaux (TND) réside dans l'identification précoce de marqueurs de trajectoires développementales atypiques. Or, on sait que les troubles de l'attention exécutive sont au cœur de la symptomatologie des TND et peuvent compromettre, chez de jeunes individus en développement, l'adaptation sociale et les apprentissages scolaires. Comprendre les mécanismes sous-jacents à l'apparition des troubles attentionnels en adoptant une perspective cross-syndromique nous semble une approche pertinente pour répondre à cette problématique. Plutôt que de se centrer sur un trouble en particulier, cette approche vise à identifier les mécanismes communs aux TND.

Si l'on adopte une perspective neuroconstructiviste, les expériences sensorielles sont aux fondements du développement cognitif. Elles fournissent au cerveau des informations sur le monde qui nous entoure et permettent à l'individu d'économiser ses ressources attentionnelles que l'on sait être limitées, en formant des modèles internes. Dès la vie fœtale, les expériences sensorielles précoces sont soumises à de nombreuses contraintes développementales. Parmi les modalités sensorielles, la modalité tactile est la première à se développer mais aussi probablement la plus vulnérable. Des patterns atypiques de traitement de l'information sensorielle tactile sont par ailleurs identifiés dans la symptomatologie des TND, conjointement

à des troubles de l'attention exécutive. La théorie du codage prédictif, est une proposition théorique pertinente pouvant expliquer les liens entre les mécanismes perceptifs et attentionnels. La prédiction sensorielle est un processus par lequel le cerveau génère des hypothèses sur les entrées sensorielles à venir en se basant sur les entrées sensorielles précédentes et ce pour former des modèles internes. Des hypothèses récentes suggèrent que le degré d'attention accordé au traitement des stimuli modulerait les prédictions sensorielles dans une boucle de *feedback* rétroactif. Récemment explorée dans la modalité tactile chez des nouveau-nés à risque, la prédiction sensorielle semble constituer un marqueur neurodéveloppemental pertinent pour identifier très tôt des patterns de traitement de l'information sensorielle tactile qui pourraient prédire un développement attentionnel atypique. Cependant, les relations entre attention exécutive et traitement sensoriel tactile ne sont pas encore explorées, à notre connaissance, chez les enfants d'âge préscolaire, période à laquelle l'attention exécutive se développe considérablement.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de fournir de nouvelles pistes de compréhension liées à l'émergence de trajectoires développementales atypiques, en particulier concernant l'attention exécutive. Nous souhaitons déterminer si le traitement sensoriel dans la modalité tactile peut constituer un marqueur de développement de l'attention exécutive chez des enfants d'âge préscolaire.

Dans le premier chapitre théorique nous présenterons l'attention exécutive en tant que construit au cœur de la cognition. Nous apporterons, en particulier, un éclairage théorique sur son développement et ses interactions avec d'autres fonctions cognitives centrales. Dans le second chapitre, nous discuterons de l'expression de troubles de l'attention exécutive au sein de la symptomatologie des TND. Nous suggérerons l'adoption d'une perspective cross-syndromique pour comprendre les troubles de l'attention exécutive. Enfin, nous aborderons, dans le troisième chapitre, les fondements sensoriels du développement cognitif. Nous mettrons tout particulièrement l'accent sur la modalité tactile, dont son expression peut témoigner de trajectoires développementales atypiques dès le plus jeune âge.

À l'issue de cette partie théorique, nous présenterons les contributions expérimentales de ce travail de thèse. Le quatrième chapitre dressera notre problématique, nos objectifs, ainsi que les résultats de deux études expérimentales. Enfin, nous discuterons dans le dernier chapitre, des perspectives tant sur le plan de la recherche fondamentale que sur le plan de la clinique des TND chez l'enfant.

Chapitre 1

L'attention exécutive : un construit au cœur de la cognition

« Rester attentif, c'est un peu comme traverser une poutre d'un bout à l'autre sans tomber. »

J-P Lachaux, Le cerveau funambule (2015)

Chapitre 1 – L'attention exécutive : un construit au cœur de la cognition

1. Introduction

L'attention est un construit multidimensionnel employé dans de nombreuses expressions du quotidien telles que « Fais attention », « Attention ! ». Tout le monde semble savoir ce à quoi fait référence l'attention et pour autant, ce construit suscite toujours des débats en psychologie. L'attention désigne un état dans lequel nous avons un niveau de concentration suffisant pour permettre un filtrage optimal de l'information provenant de notre environnement (Conejero et Rueda, 2017). Selon William James (1890) : « L'attention est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles [...]. Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres »¹. Ainsi, être attentif, c'est maintenir un état de sensibilité à notre environnement suffisamment élevé pour contrôler les informations sensorielles nous parvenant afin de réguler nos pensées, nos émotions et nos comportements. Ce concept est employé dans de nombreux champs de la psychologie : psychologie cognitive, du développement, neuropsychologie, neurosciences cognitives, etc. Il est associé à une multitude de mécanismes et de processus cognitifs comme par exemple le contrôle cognitif et les fonctions exécutives, mais également l'autorégulation.

Différents modèles de l'attention ont ainsi émergé dans la littérature en psychologie. Parmi les modèles pionniers, le modèle de Broadbent conçoit l'attention en tant que filtre, c'est-à-dire que les flux d'informations qui nous parviennent ne peuvent être traités simultanément et doivent être filtrés afin de sélectionner les informations pertinentes qui bénéficieront d'un traitement cognitif plus approfondi (Broadbent, 1957). Son modèle a ensuite été complété par les travaux de Kahneman, qui a introduit le modèle de ressources attentionnelles. Il ajoute la dimension d'effort attentionnel, permettant à l'individu de traiter deux informations simultanément qui seront réparties en fonction des buts assignés, de la motivation de l'individu et de son degré d'éveil (Kahneman, 1973).

Le modèle de Norman et Shallice va, quant à lui, introduire la notion de processus automatiques et de processus contrôlés, avec un modèle de traitement de l'information organisé en trois niveaux de contrôle attentionnel (Norman et Shallice, 1980). Le premier niveau serait

¹ Traduction de la définition formulée par William James en 1890 dans *Principles of Psychology* : « *Everyone knows what attention is. It is the taking possession by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought. [...] It implies withdrawal from some things in order to deal effectively with others.* »

associé à un répertoire de routines déclenchées automatiquement et nécessitant un traitement attentionnel minimal. Le second niveau interviendrait de façon semi-automatique, il s'agit du « gestionnaire de priorités » qui permettrait de faire passer à un niveau supérieur de traitement attentionnel un schéma prioritaire en fonction des objectifs à atteindre. Le système attentionnel superviseur (SAS) interviendrait à un troisième niveau de traitement, lorsque les traitements automatiques ne peuvent être déployés et qu'une nouvelle tâche exige la modification d'un schéma préalablement appris en vue du but à atteindre. Il permettrait, entre autres, de planifier nos actions lors de situations nouvelles, d'intervenir lors de la résolution de conflits ou de prendre des décisions lors de situations dangereuses.

Plus récemment, le modèle des réseaux attentionnels proposé par Posner et Petersen en 1990, conçoit l'attention en tant que mécanisme de contrôle et distingue trois fonctions attentionnelles (l'attention d'alerte, l'attention d'orientation et l'attention exécutive), associées à des réseaux cérébraux spécifiques (Posner et Petersen, 1990). Des études menées en neuroimagerie ont mis en évidence l'existence de réseaux attentionnels dès la naissance, permettant à l'attention de l'enfant d'être sollicitée de manière exogène vers des stimuli saillants provenant de son environnement (Posner et al., 2016). Ces réseaux se spécialiseraient au fur et à mesure des expériences et apprentissages pour permettre un contrôle croissant de l'attention de manière endogène durant la période préscolaire. Parmi ces réseaux et fonctions, l'attention exécutive est cruciale pour le développement du contrôle cognitif mais également des capacités d'autorégulation chez les enfants lors de l'entrée dans les apprentissages scolaires.

Dans ce premier chapitre, nous allons nous centrer sur ce modèle et présenter en détail les trois fonctions attentionnelles et leurs substrats cérébraux. Nous préciserons ensuite les différentes relations entre attention exécutive, contrôle cognitif et autorégulation, en fonction du domaine de la psychologie dans lequel ils ont présentés. Une fois cet éclairage théorique établi, nous proposerons une modélisation synthétique et intégrative entre psychologie cognitive et psychologie du développement. Nous discuterons ensuite du développement précoce de l'attention exécutive et de sa mise en œuvre pour les apprentissages et la réussite scolaire.

2. Le modèle des réseaux attentionnels

Dans la continuité des travaux menés par Donald Hebb, le travail de Michael Posner s'inscrit dans le champ des neurosciences cognitives, considérant de constantes interactions entre réseaux cérébraux, gènes et environnement de l'individu, et permettant de témoigner d'une base commune pour comprendre le développement attentionnel normal et pathologique (Posner et Rothbart, 2007). Son modèle distingue trois principales fonctions attentionnelles associées à des réseaux cérébraux spécifiques (Posner et Petersen, 1990): l'attention d'alerte, l'attention d'orientation et l'attention exécutive. Ces trois réseaux attentionnels ont été présentés dans un premier temps comme étant fonctionnellement indépendants dans la littérature en neuroimagerie, mais des travaux ultérieurs ont montré qu'ils peuvent être activés simultanément lorsqu'ils sont sollicités dans une tâche spécifique, *l'Attention Network Task* (ANT), que ce soit chez l'adulte (Callejas et al., 2005) ou chez l'enfant (Pozuelos et al., 2014).

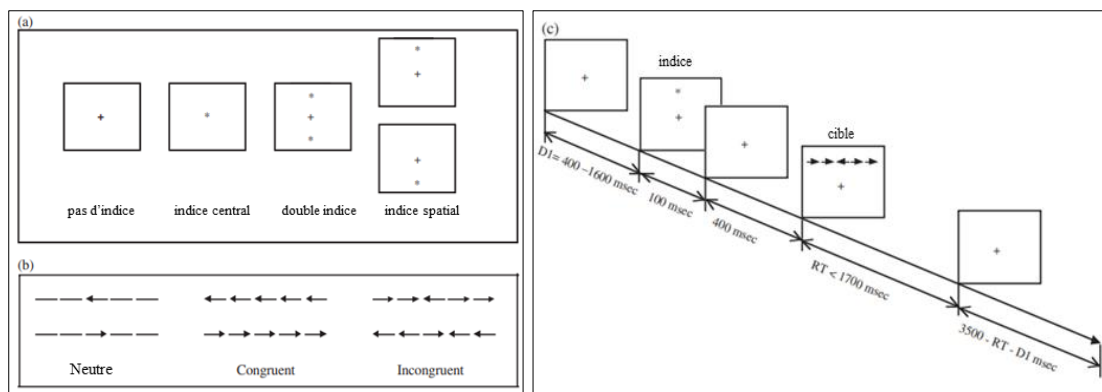


Figure 1. Procédure expérimentale de l'ANT, traduit d'après Fan et al. (2002).

L'ANT est une tâche informatisée mise au point dans un premier temps chez le sujet adulte afin d'évaluer l'efficacité des trois réseaux attentionnels (Fan et al., 2002; voir Rueda et al., 2004, pour une version adaptée à l'enfant). Cette tâche a l'avantage de ne nécessiter aucune compétence en lecture en plus d'être rapide à administrer (environ 20 minutes). Le participant doit déterminer, à l'aide de deux boutons réponses disposés sur un clavier ou un pavé tactile, dans quelle direction pointe le stimulus central, celui-ci pouvant être entouré de *flankers*² qui pointent soit dans la même direction (condition congruente), soit dans la direction opposée du stimulus central (condition incongruente) (Figure 1). Les stimuli cibles peuvent être précédés d'indices qui apparaissent soit au centre de l'écran (indice central), soit en haut et bas de l'écran simultanément (double indice), soit à la position des stimuli cibles qui seront présentés (indice

² Les *flankers* sont des distracteurs visuels présentés autour du stimulus central et semblables à celui-ci.

spatial). En condition neutre, le stimulus central est présenté seul, sans *flankers*. L'efficacité de chaque réseau attentionnel est déterminée en effectuant des soustractions entre les temps de réaction dans chaque condition expérimentale. Nous allons maintenant explorer chaque réseau cérébral de l'attention à partir des données de la littérature sur l'ANT provenant de différentes méthodologies.

2.1. L'attention d'alerte

L'attention d'alerte est toujours active pour maintenir un état de vigilance optimal. Elle permet à tout individu de rester en état d'éveil constant pour répondre aux stimuli provenant de son environnement. Parmi les différentes fonctions de l'alerte, on distingue l'alerte tonique de l'alerte phasique. L'alerte tonique correspond à un état de veille constant et est sensible aux rythmes circadiens de l'individu (Posner, 1975). L'alerte phasique est activée lorsqu'un signal avertisseur est donné et nous prépare à répondre à un stimulus. Dans les tâches comme l'ANT, le niveau d'alerte est évalué en faisant varier l'intensité des indices avant l'apparition des stimuli. Cet indice permet dans ce type de tâche, d'améliorer les temps de réaction du sujet, celui-ci étant dans des dispositions optimales pour fournir une réponse le plus rapidement possible. Roca et collaborateurs (2011) précisent que dans des tâches comme l'ANT, c'est l'efficacité de l'alerte phasique qui est mesurée et les performances d'alerte tonique sont inférées via le score d'attention d'alerte, ne fournissant pas un indicateur précis de son efficacité. L'efficacité du réseau d'alerte par les mesures de l'ANT est obtenue en soustrayant les temps de réaction dans la condition double indice de la condition où aucun indice n'est présenté. Bien que les capacités d'alerte soient présentes dès la naissance, les travaux menés chez les enfants rapportent un développement des capacités d'alerte jusqu'à l'âge de dix ans (Rueda, Fan, et al., 2004a).

Le réseau d'alerte est associé aux régions thalamiques, tout comme aux régions frontales et pariétales du cortex cérébral, en particulier latéralisées à droite (Fan et al., 2005). Des activations dans le *locus caeruleus* sont également présentes lors des situations d'alerte, siège d'activation de la norépinéphrine, un neuromodulateur de l'alerte (Posner, 2008). Parmi les potentiels évoqués cérébraux³ de l'alerte, les composants N1 observés en régions pariétales et P2 observés en fronto-central associés à la préparation attentionnelle et à l'activation de

³ Un potentiel évoqué cérébral (en anglais *Event Related Potential*) est obtenu à l'aide de mesures cérébrales, le plus souvent en électroencéphalographie, et permet de traduire les modifications de l'activité électrique cérébrale en lien avec une stimulation extérieure, quelle que soit sa modalité de présentation.

processus sensoriels automatiques, sont notables après la présentation du signal auditif (Abundis-Gutiérrez et al., 2014). La variation négative contingente, une onde négative lente distribuée sur les régions frontales, centrales et pariétales, est également observée avant l'apparition des stimuli cibles à l'écran. Elle est associée au maintien de l'effort attentionnel entre la période d'attente annoncée par l'indice d'alerte et l'apparition de la cible à l'écran.

2.2. L'attention d'orientation

L'attention d'orientation permet à l'individu de sélectionner les informations sensorielles provenant de son environnement. Posner (1980) distingue l'orientation de la détection, dans la mesure où la détection est possible dès lors que le stimulus a atteint un seuil sensoriel suffisant au niveau du système nerveux pour permettre son traitement effectif et conscient, alors que l'orientation est une étape préalable qui permet de se déplacer en direction du stimulus. Cette capacité d'orientation est présente dès la naissance et observable à l'aide de tâches présentant différentes cibles visuelles sollicitant l'anticipation du regard (Sheese et al., 2008). Les travaux menés chez des enfants d'âge scolaire rapportent des compétences stables de l'attention d'orientation durant l'enfance (Rueda, Fan, et al., 2004a). Elle est évaluée en manipulant la localisation d'indices visuo-spatiaux précédant les stimuli cibles. De cette manière, l'individu doit diriger son attention sur l'endroit indiqué pour réaliser la tâche. Dans l'ANT, lorsque l'indice précédant le stimuli cible est invalide, l'attention doit être réorientée dans la bonne direction pour traiter le stimulus cible. L'efficacité du réseau d'orientation est obtenue en soustrayant les temps de réaction dans les conditions en présence d'indices visuo-spatiaux des temps de réaction dans les conditions avec des indices centraux. Des travaux plus récents utilisant cette tâche ont effectué la soustraction entre les indices visuo-spatiaux (indices valides et indices invalides) pour mesurer l'efficacité de l'attention d'orientation et ont mis en évidence des effets développementaux semblables à des travaux précédents, suggérant que la présence d'un indice neutre dans la tâche n'est pas nécessaire (Abundis-Gutiérrez et al., 2014).

Le réseau d'orientation est associé à des zones frontales et pariétales et des structures sous-corticales telles que la jonction temporo-pariétale, le pulvinar ou le colliculus supérieur (Figure 2A). Les études pharmacologiques portant sur les réseaux attentionnels ont mis en évidence l'acétylcholine comme étant le neuromodulateur principal impliqué dans l'attention d'orientation (Marrocco et Davidson, 1998). Parmi les potentiels évoqués cérébraux associés à l'attention d'orientation, les composants P1 et P3 d'amplitudes positives sont observés en régions pariétale et occipitale. La modulation de la composante P1 est associée à la facilitation

du traitement sensoriel par l'attention tandis que la modulation de la composante P3 est associée au processus d'évaluation du stimulus (Abundis-Gutiérrez et al., 2014). Une amplitude élevée de la P3 traduit généralement une discordance entre le stimulus perçu lors de sa présentation et la préparation sensori-motrice préalablement associée.

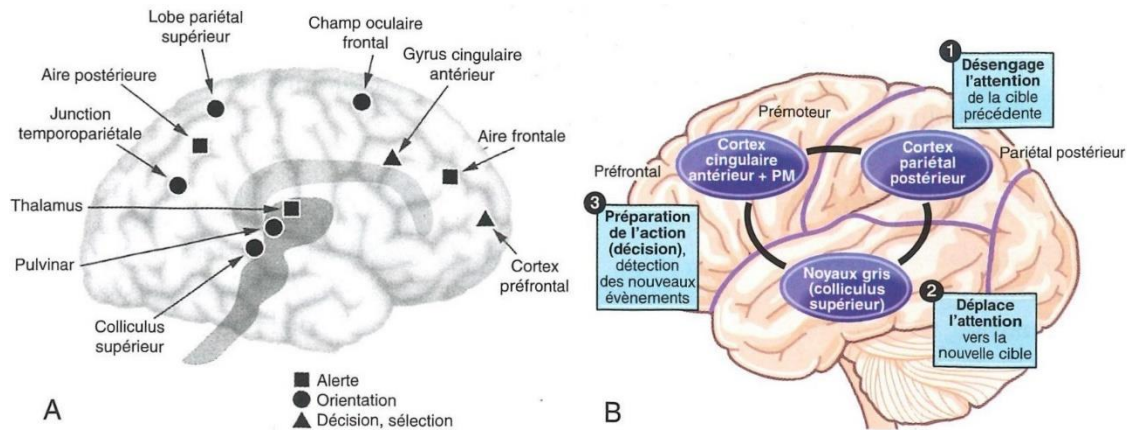


Figure 2. A- Anatomie des trois réseaux attentionnels : l'attention d'alerte, l'attention d'orientation et l'attention exécutive (d'après Posner et Rothbart, 2007). B- Grands réseaux impliqués dans l'attention d'orientation. Figures traduites en français par Carole Fumat au sein de l'ouvrage Neuropsychologie et troubles des apprentissages, Mazeau et al. (2021).

2.3. L'attention exécutive

L'attention exécutive permet à l'individu d'exercer un contrôle volontaire de son attention, lui permettant d'allouer à bon escient ses ressources attentionnelles limitées (Mackie et al., 2013). Elle est impliquée dans la résolution de conflits cognitifs mais aussi dans les capacités d'autorégulation de l'individu (Posner et al., 2013). Différentes opérations sont nécessaires pour parvenir à résoudre une situation de conflit cognitif : la détection du conflit, sa mise en contexte et l'allocation des ressources attentionnelles pour parvenir à le résoudre et déclencher l'action adaptée. L'attention exécutive est mise en évidence dans l'ANT lorsque le sujet doit discriminer la direction des stimuli cibles dans la condition incongruente nécessitant d'inhiber l'information saillante provenant des *flankers*. L'efficacité du réseau exécutif est obtenue en soustrayant les temps de réaction observés dans la condition congruente à ceux observés dans la condition incongruente.

Le réseau exécutif est constitué du cortex préfrontal, des ganglions de la base, de l'insula, mais également du cortex cingulaire antérieur. Ce dernier est impliqué dans la modulation du système dopaminergique, principal neuromodulateur de l'attention exécutive avec la sérotonine. Des dysfonctionnements dopaminergiques dans les aires préfrontales sont associés à des difficultés dans la résolution de conflits, mais aussi dans le contrôle inhibiteur

et la flexibilité attentionnelle (Brocki et al., 2009). Par ailleurs, les travaux menés par Botvinick et collaborateurs (2004) ont montré que le cortex cingulaire antérieur serait impliqué dans la détection et la surveillance du conflit tandis que sa résolution serait gérée par les zones frontales latérales.

Dans une révision de leur modèle, Petersen et Posner (2012) ont reconsidéré l'organisation du réseau exécutif en distinguant deux sous-réseaux : le réseau préfrontal dorsolatéral et le réseau cingulo-operculaire. Cette vision est soutenue par Dosenbach et collaborateurs (2008), qui postulent une architecture duelle du contrôle exécutif *top-down* dans laquelle le réseau préfrontal dorsolatéral interviendrait dans l'initiation de la tâche et ses ajustements en temps réel ainsi que la flexibilité cognitive, tandis que le réseau cingulo-operculaire interviendrait dans le maintien attentionnel tout au long des essais pour réussir une tâche donnée.

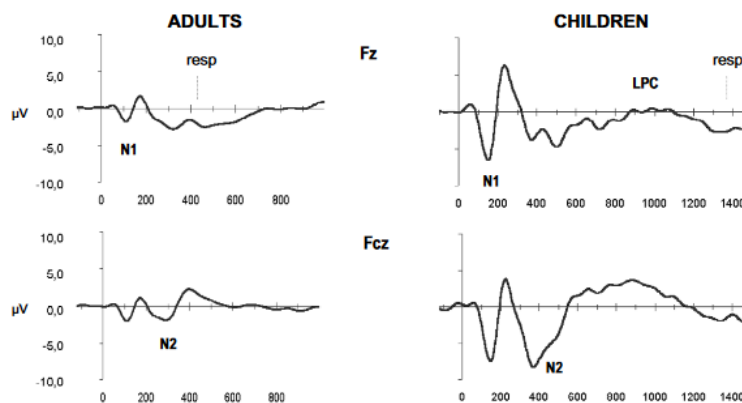


Figure 3. Potentiels évoqués cérébraux associés à l'attention exécutive, d'après Rueda et al. (2004).

Le traitement de la congruence des stimuli module le potentiel évoqué N2 associé au contrôle exécutif (Figure 3). Ce potentiel évoqué, une composante négative observée en région fronto-pariétale est observé entre 200 et 400 ms post stimuli chez les sujets adultes (Kopp et al., 1996) et plus tardivement chez les enfants entre 600 et 800 ms post stimuli (Rueda et al., 2004). La littérature décrit généralement une amplitude de cette composante plus élevée en condition incongruente qu'en condition congruente, indiquant un effort plus coûteux pour supprimer l'information non pertinente. Une faible différence de modulation de cette composante entre les conditions incongruente et congruente traduit de bonnes capacités de contrôle cognitif chez l'individu. Des composantes positives tardives (LPC) sont également associées à l'attention exécutive et sont sensibles à la détection de conflit (Figure 3). Elles sont généralement observées entre 500 et 800 ms après la présentation des stimuli (Abundis-

Gutiérrez et al., 2014). Le rôle de ces composantes dans des tâches de conflit cognitif est débattu dans la littérature. Certains auteurs suggèrent que ces activations puissent être liées à l'implémentation du contrôle attentionnel avant la réponse (Larson et al., 2009), tandis que d'autres auteurs observent ces activations après la réponse et suggèrent davantage une réponse cérébrale spécifique à la résolution du conflit cognitif (West, 2003).

De manière générale, les terminologies associées à l'attention exécutive sont multiples et parfois confondues dans la littérature. Ainsi, lorsque l'on se réfère au construit d'attention en tant que mécanisme de contrôle volontaire des pensées et des comportements, il est fréquent de voir des superpositions de terminologies associées à l'attention exécutive telles que les fonctions exécutives ou bien encore l'autorégulation, laissant penser que ces construits sont interchangeables en fonction du champ de la psychologie dans lequel ils sont employés. Dans la section suivante, nous allons clarifier ces concepts afin d'offrir une modélisation intégrative des différents construits en lien avec l'attention exécutive.

3. Quelle(s) fonction(s) pour l'attention exécutive au sein de la cognition ?

L'attention exécutive joue un rôle fondamental au sein de la cognition humaine. Elle est impliquée dans de nombreuses fonctions cognitives essentielles au bon développement de l'individu, comme la régulation des comportements, des pensées et des émotions, mais aussi les apprentissages. Il n'est ainsi pas surprenant de retrouver de nombreux construits théoriques en lien avec l'attention exécutive, sans faire consensus quant à leurs fonctions et leurs relations avec l'attention exécutive. Au regard de ce constat, il semble difficile de s'accorder sur les relations entre l'attention exécutive et les fonctions cognitives associées. Dans cette section, nous allons clarifier la relation qu'entretient l'attention exécutive avec le contrôle cognitif, en lien avec les différentes fonctions exécutives, mais également avec l'autorégulation et le contrôle de l'effort, en tenant compte des divergences théoriques existantes dans la littérature. À partir de cette réflexion théorique, nous proposerons une modélisation en fin de section.

3.1. Attention exécutive et contrôle cognitif

Les trois fonctions attentionnelles, dont l'attention exécutive, contribuent à la mise en œuvre d'un contrôle cognitif efficient (Mackie et al., 2013). Ce construit a émergé dans la littérature en neurosciences cognitives pour désigner l'ensemble des mécanismes attentionnels

permettant une régulation des comportements en fonction des objectifs ou dans des situations de conflit cognitif (Dubin et al., 2010; Gratton et al., 2018). Pour reprendre la définition proposée par Botvinick et Braver (2015), le contrôle cognitif désigne « un ensemble de fonctions cognitives superordonnées qui encodent et maintiennent une représentation de la tâche en cours, ainsi que la coordination des fonctions subordonnées incluant la mémoire de travail, la mémoire sémantique et épisodique, l'attention perceptive, la sélection des actions et l'inhibition »⁴. Au regard de cette définition, il n'est pas surprenant de retrouver contrôle cognitif et fonctions exécutives de manière conjointe dans la littérature, puisque les tâches de performances évaluant des composantes du contrôle cognitif comprennent des mesures de fonctions exécutives spécifiques. D'un point de vue neural, contrôle cognitif et fonctions exécutives partagent des activations cérébrales communes au sein de régions du cortex préfrontal (Friedman et Robbins, 2022). En revanche, utiliser contrôle cognitif et fonctions exécutives de manière interchangeable n'est, de notre point de vue, pas approprié. Les fonctions exécutives comprennent des composantes spécifiques permettant la mise en œuvre d'un contrôle cognitif efficient.

Les fonctions exécutives désignent un ensemble de fonctions cognitives qui sont employées par l'individu pour gérer pensées, émotions et comportements dans des situations nouvelles nécessitant un traitement plus approfondi lorsque les routines d'actions ou schémas internes ne sont pas suffisants. Les travaux menés par Miyake et collaborateurs (2000) furent parmi les premiers à tenter de comprendre les relations entre les différentes fonctions exécutives afin de fournir un cadre empirique, permettant de préciser leur rôle au sein de la cognition. Après analyses en composantes principales, les auteurs ont distingué trois fonctions exécutives : la flexibilité mentale, le contrôle inhibiteur et la mise à jour des informations en mémoire de travail (*updating*). Cette équipe de recherche a tenté de comprendre l'origine des différences individuelles concernant les fonctions exécutives. Ils ont montré que les fonctions exécutives sont distinctes, mais également interconnectées, ce qui signifie qu'elles partagent certaines ressources cognitives, c'est le cadre théorique de l'unité/diversité des fonctions exécutives (Miyake et Friedman, 2012).

⁴ Traduction de la définition suivante proposée par Botvinick et Braver (2015) : « *the set of superordinate cognitive functions that encode and maintain a representation of the current task, marshaling to the task subordinate functions including working, semantic, and episodic memory; perceptual attention; and action selection and inhibition* ».

Le modèle de Diamond dessine une vue d'ensemble des construits permettant la mise en œuvre d'un contrôle cognitif efficient (Figure 4). Dans la revue de littérature accompagnant le modèle théorique, elle reprend des éléments développementaux concernant le développement et l'évaluation des fonctions exécutives chez les enfants mais discute peu de la part de variance commune entre ces dernières si ce n'est pour la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur, qu'elle appose au même rang sur son modèle. Le modèle distingue trois fonctions exécutives principales (flexibilité mentale, contrôle inhibiteur et mémoire de travail) et des fonctions exécutives d'ordre supérieur (raisonnement, résolution de problèmes et planification). Au sein du modèle sont également mis en relation les termes fréquemment associés aux fonctions exécutives dans la littérature avec entre autres, l'attention exécutive, mais également l'autorégulation et le contrôle de l'effort. Bien que la mémoire de travail soit employée dans de nombreux travaux en psychologie du développement en tant que fonction exécutive, nous soutenons la terminologie employée par Miyake et collaborateurs (2000) qui distingue la mémoire de travail de la fonction de mise à jour. La mise à jour n'est qu'une composante de la mémoire de travail, cette dernière étant désormais confondue à tort avec la notion de mise à jour dans la littérature des fonctions exécutives. Nous présenterons ainsi ces deux construits de façon distincte, contribuant tous deux à l'efficacité du contrôle cognitif.

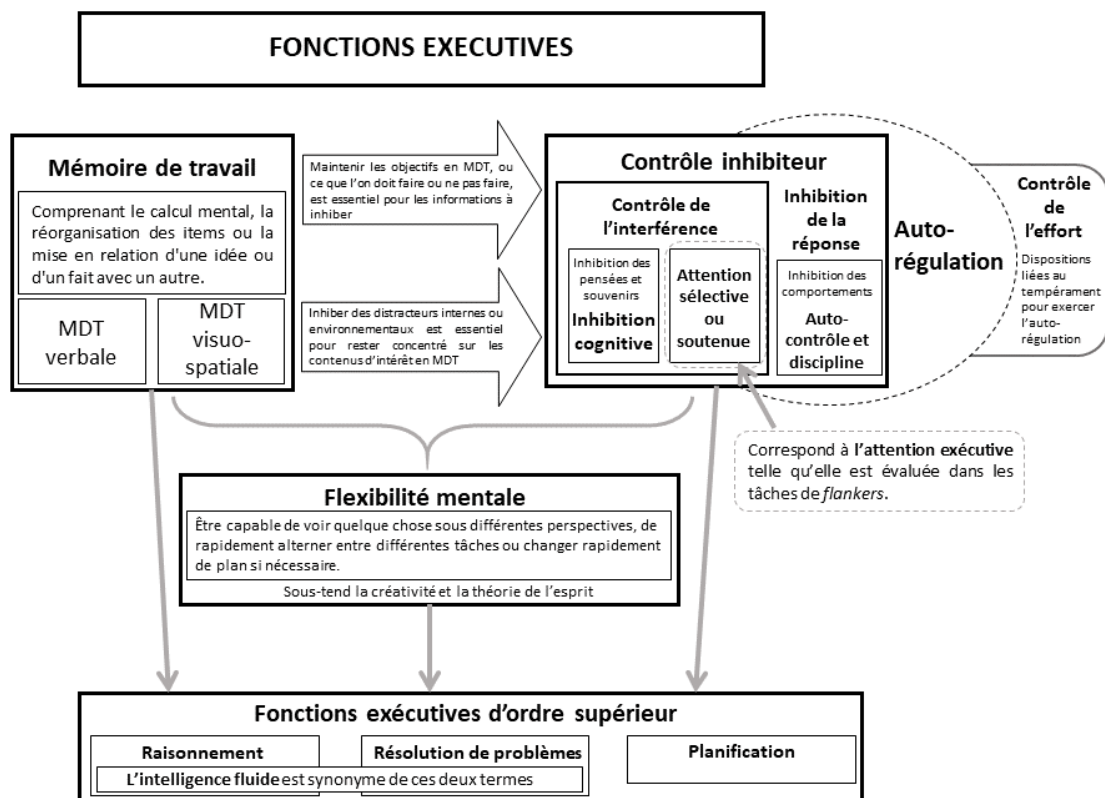


Figure 4. Modèle des fonctions exécutives, traduit en français d'après Adèle Diamond (2013).

La flexibilité cognitive est un processus dynamique qui permet à l'individu d'alterner entre différents processus mentaux afin de produire une réponse adaptée. Elle nous permet d'adapter nos comportements dans des situations nouvelles et de passer rapidement d'une activité à une autre sans être perturbé. Par exemple, lorsqu'une route que vous empruntez régulièrement pour aller au travail est en travaux, vous allez mobiliser vos capacités de flexibilité cognitive pour trouver rapidement une solution alternative, c'est-à-dire emprunter un autre chemin. De bonnes capacités de flexibilité cognitive sont associées à une meilleure adaptation sociale et de meilleurs taux de résilience aux événements de vie négatifs ou stressants (Genet et Siemer, 2011). Elle est généralement mesurée à l'aide de paradigmes comportementaux ou de tests psychométriques, dans lesquels le sujet doit rapidement appliquer des consignes changeantes au cours de sa progression dans la tâche, comme la tâche de tri de cartes dite *Wisconsin Card Sorting Task*⁵ (Heaton et al., 1993). Dans cette tâche, le sujet doit classer des cartes construites selon trois critères que sont la couleur (rouge, bleu, jaune ou vert), la forme (triangle, rond, étoile, ou croix), et le nombre (1, 2, 3, ou 4) selon une règle qu'il doit déduire d'après des retours fournis en cours de tâche. Dès que la règle est maîtrisée, une nouvelle règle est introduite et modifie les retours par rapport à ceux attendus par le sujet, qui doit alors déduire la nouvelle règle. Une mesure semblable, la tâche *Dimensional Change Card Sorting task* (DCCS) évalue la flexibilité cognitive chez les enfants (Frye et al., 1995; Zelazo et al., 2003).

Il apparaît parfois délicat de distinguer la spécificité de la flexibilité cognitive en raison de la diversité des mesures employées pour l'évaluer et des divergences théoriques existantes dans la littérature associée aux fonctions exécutives (Clément, 2021). La mise en œuvre de la flexibilité cognitive intervient de concert avec d'autres fonctions exécutives et attentionnelles, d'autant plus que ces fonctions partagent une base développementale commune (Zelazo et al., 2008). Les observations comportementales sont en accord avec des données d'imagerie cérébrale qui rapportent des réseaux communs entre la flexibilité cognitive et l'attention (Dajani et al., 2016). Parmi ces réseaux, on retrouve le réseau neural de la saillance, qui permet de détecter des stimuli pertinents dans notre environnement et de coordonner nos ressources neurales. Ce réseau comprend l'insula antérieure, le cortex cingulaire antérieur dorsal ainsi que d'autres structures sous-corticales et limbiques (Uddin, 2016).

⁵ La version française de la tâche est accessible via les éditions Hogrefe : <https://www.hogrefe.fr/produit/raisonnement-wcst-test-de-classement-de-cartes-du-wisconsin/>

Le contrôle inhibiteur renvoie à la capacité du sujet à supprimer une réponse ou un comportement non pertinent dans une situation donnée. Sans capacité d'inhibition, nous sommes voués à des comportements impulsifs et non-adaptés dans de nombreux contextes, comme les situations sociales. L'effet *Stroop* met en évidence les capacités de contrôle inhibiteur de l'individu au travers d'une tâche expérimentale du même nom : l'individu doit dénommer la couleur de l'encre dans laquelle un nom de couleur est écrit, ces deux éléments n'étant pas congruents. Par exemple, « **bleu** ». Cette tâche met en évidence la difficulté de l'individu alphabétisé à ignorer l'information non pertinente, mais saillante car résultant de processus automatisés impliqués dans la lecture. Il existe par ailleurs des versions adaptées aux enfants non lecteurs: le Stroop animaux (Wright et al., 2003), le Stroop couleur-objet (Prevor et Diamond, 2005), le Stroop jour-nuit (Gerstadt et al., 1994) ou bien le Stroop fruits (Monette et Bigras, 2008).

Deux types d'inhibition sont distingués dans la littérature : l'inhibition de la réponse (également appelée inhibition motrice ou comportementale) et l'inhibition attentionnelle (également appelée contrôle ou suppression de l'interférence). L'inhibition de la réponse fait référence au processus de suppression d'une réponse motrice prépondérante dans une situation donnée. Elle est généralement évaluée à l'aide de tâches demandant de supprimer de manière intermittente une réponse motrice comme le go/no-go ou bien les tâches de stop signal. L'inhibition attentionnelle fait référence à la résistance à l'interférence par des stimuli provenant de notre environnement. Elle est étudiée à l'aide de tâches d'appariement visuel qui demandent au sujet de comparer des séries de stimuli tout en ignorant des distracteurs non-pertinents pour réussir la tâche. La distinction entre ces deux types d'inhibition est subtile, et généralement les paradigmes de recherche les confondent ou les mesurent conjointement (Tiego et al., 2018). Le travail princeps effectué par Friedman et Miyake (2004), à l'aide d'un modèle en équations structurelles, a permis de mettre évidence que ces deux construits étaient fortement associés et pouvaient être inclus dans une composante inhibitrice commune chez les sujets adultes. Les travaux menés en neuroimagerie mettent en évidence des similitudes entre les régions impliquées dans l'attention exécutive et le contrôle inhibiteur, avec entre autres, le cortex préfrontal ventrolatéral droit, le cortex préfrontal dorsolatéral droit, mais également le réseau cingulo-operculaire (Apšvalka et al., 2022).

La fonction de mise à jour des informations en mémoire de travail requiert des capacités de surveillance et d'encodage des informations entrantes pour vérifier leur pertinence par rapport à la tâche en cours, puis la comparaison et l'actualisation des éléments conservés en

mémoire de travail (Miyake et al., 2000). La mise à jour est une des composantes clés de la mémoire de travail conjointement à la capacité de maintien des informations. Mise à jour et maintien sont deux demandes contradictoires gérées par un mécanisme de *gating*⁶, permettant un contrôle sélectif de la mise à jour (Kessler et Oberauer, 2014). La fonction de mise à jour est impliquée dans les compétences académiques telles que la lecture (Carretti et al., 2005) et les mathématiques (Pelegrina et al., 2015). Elle est généralement évaluée dans des tâches de type *n-back* nécessitant la reconnaissance d'éléments précédemment présentés dans une série de stimuli successifs.

Afin de comprendre les processus cérébraux sous-jacents liés à la fonction de mise à jour, Nir-Cohen et collaborateurs (2020) ont utilisé une version adaptée de la tâche de *n-back*, la tâche de référence *n-back*, conjointement à des mesures en IRMf. Cette tâche permet de dissocier les deux composantes de mise à jour et de maintien au sein de la mémoire de travail. Elle se compose de deux catégories d'essais, les essais de comparaison nécessitant un appariement, et les essais de référence nécessitant à la fois appariement et mise à jour. Les auteurs ont mis en évidence des activations cérébrales spécifiques dans l'action de mise à jour des informations en mémoire de travail au sein des ganglions de la base, du thalamus et du cortex fronto-pariétal mais également dans le cortex sensoriel, pertinent pour la réalisation de la tâche (dans cette tâche, l'aire fusiforme des visages). Ces résultats mettent en évidence la spécificité de la mise à jour et du maintien des informations au sein de la mémoire de travail.

Définir la mémoire de travail n'est pas chose simple. Cowan (2017) en relève neuf définitions différentes dans la littérature en psychologie. Nous retiendrons la définition proposée dans l'ouvrage de Barrouillet et Camos (2022) : « La mémoire de travail est un système cognitif spécifiquement dévolu au maintien temporaire et au traitement de l'information nécessaire à la réalisation de tâches orientées vers un but et contrôlées par le sujet ». Le modèle de Baddeley illustre la complexité de ce système à composantes multiples, ayant chacune une fonction spécifique (Baddeley, 1986). Parmi ces composantes, on retrouve la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial, le buffer épisodique et l'administrateur central, un système de contrôle superviseur des informations perçues, également appelé le centre de contrôle exécutif. Les régions cérébrales associées à la mémoire de travail sont les régions fronto-pariétales du cortex mais également des régions sous-corticales comme le cervelet (Chai et al., 2018).

⁶ Le mécanisme de *gating* assure un contrôle des entrées sensorielles permettant un maintien de l'information ou sa mise à jour en fonction du contexte.

Les mesures des fonctions exécutives et de mémoire de travail partagent une part de variance commune (Brocki et Tillman, 2014; Roncadin et al., 2007) qui pourrait être expliquée par l'attention exécutive, qui permettrait de maintenir les objectifs de la tâche assignée et de résoudre des conflits cognitifs dans des tâches plus complexes (McCabe et al., 2010). Dans ce cadre théorique, l'attention exécutive ne se résume pas uniquement au modèle des réseaux attentionnels mais désigne davantage un système de contrôle exécutif tout comme dans le modèle de Baddeley. L'attention exécutive est ainsi étroitement liée à la mémoire de travail, dans la mesure où elle permet de maintenir des informations en mémoire dans un état actif en présence d'interférences. Ce champ de littérature inclut également les capacités d'intelligence fluide, qui partagent également une part de variance commune avec les mesures de mémoire de travail (Kane et Engle, 2002). Des modélisations du contrôle inhibiteur ajoutent une hiérarchie entre les différentes composantes cognitives, notamment en plaçant la mémoire de travail en tant que construit cognitif de plus haut niveau (Tiego et al., 2018). L'analyse en équations structurelles effectuée dans l'étude de Tiego et collaborateurs auprès d'une population de 136 pré-adolescents a permis de mettre en évidence que la part de variance expliquée entre les deux composantes du contrôle inhibiteur venait des différences individuelles concernant la capacité de mémoire de travail.

Des travaux menés dans le champ de la mémoire de travail suggèrent un modèle de partage temporel des ressources attentionnelles (*Time-Based Resource-Sharing*) (Camos et Barrouillet, 2014). Au sein de ce modèle, les ressources attentionnelles sont partagées sur une base temporelle au sein de la mémoire de travail entre l'activité de stockage et l'activité de traitement de l'information. Les auteurs tiennent compte de la temporalité du coût cognitif de certaines tâches qui ne permettent pas un rafraîchissement immédiat des ressources attentionnelles à disposition pour traiter et maintenir l'information. Ces deux composantes de stockage seraient en interaction avec un système central. En continuité de ce modèle, le modèle de mémoire de travail avec contrôle exécutif distribué distingue, quant à lui, une double conception du contrôle exécutif : une composante de contrôle réactif, permettant de prévenir et corriger les erreurs et une composante de contrôle proactif permettant le maintien des buts de la tâche (Vandierendonck, 2016).

Ainsi, nous soutenons que la mise en œuvre de l'attention exécutive est sous-tendue par la flexibilité cognitive, le contrôle inhibiteur, la fonction de mise à jour des informations en mémoire de travail et la mémoire de travail. L'ensemble de ces construits contribue à un

contrôle cognitif efficient, en interaction avec l'autorégulation pour modifier et sélectionner des objectifs en fonction de la tâche et du contexte, sous l'influence de facteurs multiples.

3.2. Du contrôle cognitif à l'autorégulation

Différentes perspectives de recherche ont émergé dans la littérature pour aborder les fonctions cognitives liées à l'autorégulation, en fonction des champs de la psychologie dans lesquels elle est introduite. Baumeister et Vohs (2016) proposent la définition suivante : l'autorégulation est « un processus par lequel le soi modifie intentionnellement ses propres réponses, notamment ses pensées, ses impulsions, ses performances et ses comportements, en fonction de normes. Ces normes sont des idées sur la façon dont quelque chose devrait être ou ne pas être. Elles comprennent les principes, les standards, les valeurs, la morale, les lois, les exigences et les réactions similaires des autres ou de soi-même dans le passé »⁷. Les travaux menés dans le champ de l'autorégulation mettent en avant des aspects cognitifs, comportementaux et émotionnels permettant à l'individu de répondre de manière adaptée à des situations provenant de notre environnement (McClelland et al., 2010).

Les mécanismes de contrôle de l'attention, dont l'attention exécutive, soutiennent les capacités d'autorégulation de la cognition (Rueda et al., 2021). D'un point de vue fonctionnel, attention exécutive et autorégulation partagent des bases neurales communes au niveau du cortex cingulaire antérieur (Posner et al., 2007). Entre 3 et 6 ans, les capacités d'autorégulation se développent considérablement, en lien avec la maturation du cortex cérébral et la mise en œuvre des capacités d'attention exécutive (Berger et al., 2007). Par ailleurs, dès la période préscolaire, des différences interindividuelles concernant les capacités d'autorégulation ont des conséquences sur les apprentissages scolaires ultérieurs (Blair, 2002; Blair et Razza, 2007).

D'un point de vue comportemental, l'autorégulation est également associée à des dimensions liées au tempérament. Le tempérament désigne des tendances individuelles sur le plan comportemental, émotionnel, neural et physiologique de réponse aux stimuli provenant de notre environnement (Rothbart et Rueda, 2005). Nommé dans la littérature anglo-saxonne *effortful control*, le contrôle de l'effort est la composante régulatrice du tempérament (Rothbart et al., 2007). C'est au travers d'une analyse factorielle du *Children's Behavior Questionnaire*

⁷ Traduction de la définition suivante: « We define self-regulation as processes by which the self intentionally alters its own responses, including thoughts, emotions, impulses, performance, and behaviors, based on standards. Standards are ideas about how something should or should not be. They include goals, norms, values, morals, laws, expectations, and comparable responses by others or by oneself in the past. »

(CBQ) qu'un facteur général de contrôle de l'effort a pu être identifié (Rothbart et al., 2001). Ce facteur comprend différentes dimensions dans lesquelles sont inclus le focus attentionnel et le contrôle inhibiteur, qui se distinguent d'autres facteurs généraux d'extraversion et d'affects émotionnels négatifs. Le développement du contrôle de l'effort est par ailleurs fortement associé au développement de l'attention exécutive durant la période préscolaire (Rothbart et al., 2003).

Le modèle intégratif proposé par Bailey et Jones (Figure 5) inscrit l'autorégulation en relation avec des processus cognitifs organisés en quatre différents niveaux de complexité : des processus unitaires (mémoire de travail, flexibilité cognitive, contrôle attentionnel, inhibition, délai), des processus multidimensionnels comprenant ces processus unitaires (entre autres, fonctions exécutives et contrôle de l'effort), des processus cognitifs plus complexes (planification, résolution de problèmes, régulation émotionnelle) et l'autorégulation serait un facteur supra-ordinal qui recouvrirait l'ensemble des processus précédemment cités (Bailey et Jones, 2019). Ce modèle distingue les aspects émotionnels dits « chauds » associés au contrôle de l'effort et les aspects davantage cognitifs dits « froids » associés aux fonctions exécutives.

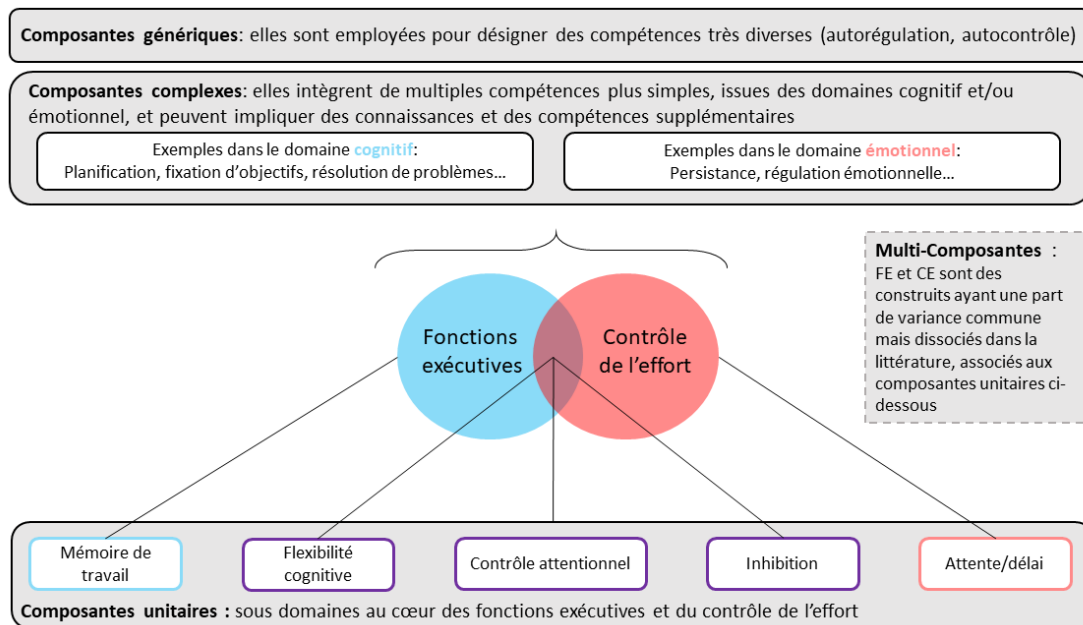


Figure 5. Modèle intégratif de l'autorégulation présenté par Bailey et Jones ; les composantes en bleu sont associées au domaine cognitif, les composantes en rouge sont associées au domaine émotionnel et les composantes en violet sont employées dans les deux domaines. Traduit en français d'après Jones, S. M., Bailey, R., Barnes, S. P., & Partee, A. 2016. OPRE Report # 2016-88, Washington, DC: Office of Planning, Research and Evaluation, Administration for Children and Families, U.S. Department of Health and Human Services. (2016).

Les débats théoriques concernant l'autorégulation sont loin d'être clos et s'étendent à l'ensemble des travaux portant sur l'attention exécutive et le contrôle cognitif. Des travaux récents proposent des mises en relation de ces différents construits (Bailey et Jones, 2019;

Diamond, 2013; Gratton et al., 2018; Nigg, 2017; Schmidt et al., 2022; Tiego et al., 2020; Zhou et al., 2012), pourtant les confusions de termes demeurent dans la littérature. Dans la section suivante, nous proposons une discussion des différents construits précédemment cités en lien avec l'attention exécutive.

3.3. Vers une modélisation de ces construits en interaction avec l'attention exécutive

La modèle de Diamond (2013) nous semble pour partie inexact concernant plusieurs éléments impliqués dans le contrôle cognitif. Premièrement, l'attention exécutive est restreinte à la fonction de contrôle inhibiteur, ce qui n'est pas le cas dans d'autres études qui mettent en évidence des relations avec d'autres fonctions exécutives et la mémoire de travail (Kane et al., 2016; Tiego et al., 2020). Nous soutenons que l'activation du réseau exécutif et la mise en œuvre de l'attention exécutive sous-tendent l'efficacité des fonctions exécutives mais ne peuvent se confondre (Mackie et al., 2013). Ensuite, comme nous l'avons précédemment abordé dans la section sur la mémoire de travail, celle-ci est à distinguer de la fonction de mise à jour et entretient de fortes relations avec l'attention exécutive, qui ne sont pas prises en compte dans ce modèle. Enfin, le rôle de l'autorégulation en interaction avec le contrôle inhibiteur nous apparaît également inexact au regard des données récentes de la littérature mettant en évidence des relations beaucoup plus étendues de l'autorégulation sur les mécanismes de contrôle de la cognition (Bailey et Jones, 2019; Blair et Ku, 2022).

Le modèle de l'autorégulation présenté par Bailey et collaborateurs (2019) entretient également la confusion entre mémoire de travail et mise à jour au sein des fonctions exécutives. La distinction entre le cognitif et l'émotionnel est présentée dans ce modèle, ce qui nous apparaît être une proposition intéressante. Toutefois, nous défendons une synergie cognition-émotion qui ne nécessite pas une distinction précise au sein des différents construits du modèle. Un modèle unifactoriel semble plus adapté au regard des mesures impliquant l'autorégulation (Lin et al., 2019; Schmidt et al., 2022). Le modèle de Bailey et collaborateurs (2019) n'intègre également pas la notion d'attention exécutive, qui est pourtant en relation directe avec les fonctions exécutives et le contrôle de l'effort. Des travaux menés auprès d'adolescents ont mis en évidence que le facteur d'attention exécutive permettait d'expliquer 30% de variance des capacités d'autorégulation, mesurées par les inventaires d'évaluation des fonctions exécutives et du contrôle de l'effort (Tiego et al., 2020). Chez les enfants d'âge préscolaire, l'étude menée

par Schmidt et collaborateurs (2022) a mis en évidence des corrélations entre fonctions exécutives et contrôle de l'effort via des hétéro-questionnaires. Plus spécifiquement, la composante de contrôle inhibiteur est à l'interface des deux composantes, les analyses corrélationnelles étant significatives même en combinant différentes méthodes (mesures de performance et hétéro-questionnaires). Les auteurs placent néanmoins l'autorégulation en interaction multiple avec tous les construits du modèle, proposition que nous soutenons.

Intégrer les différentes terminologies renvoyant au contrôle cognitif et provenant de différentes traditions de recherche contribuerait à adopter une perspective interdisciplinaire offrant des possibilités prometteuses pour les travaux de recherche, mais également de nouvelles perspectives cliniques de diagnostic et d'intervention. Une telle proposition a été modélisée par Bavelier et Green (2019) incluant les différentes terminologies associées aux fonctions exécutives et à l'attention. Ce modèle considère des relations étroites entre les différents champs de littérature associés à l'attention et aux fonctions exécutives mais n'intègre pas l'autorégulation. Au regard de ces différents éléments, nous proposons un modèle synthétique des différents construits cités dans la littérature en lien avec l'attention exécutive afin de nourrir la réflexion théorique précédemment exposée et d'offrir une vision intégrative témoignant de la multiplicité des construits (Figure 6). Notre modèle vise à intégrer les terminologies employées en psychologie du développement et en psychologie cognitive afin de ne pas entretenir le flou conceptuel autour de ces termes, fréquemment décrié dans la littérature.

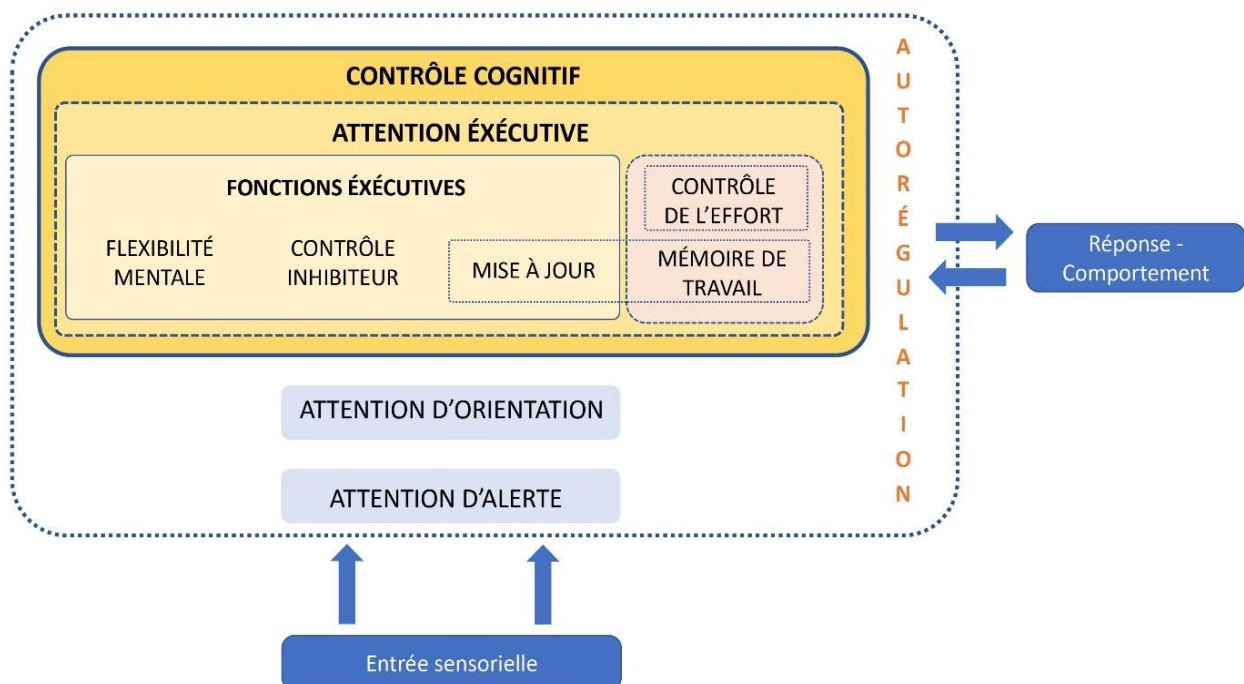


Figure 6. Proposition de modèle théorique autour du construit d'attention exécutive en lien avec le contrôle cognitif et l'autorégulation.

Ce modèle introduit la place de l'entrée sensorielle à la base de toute forme attentionnelle, permettant une activation des réseaux de l'attention et leur mise en œuvre sur le plan comportemental. Dans un premier temps, l'attention exogène est mobilisée via l'attention d'alerte et l'attention d'orientation puis progressivement un contrôle endogène de l'attention va s'opérer via l'attention exécutive. Dans notre modèle, l'attention exécutive⁸ est au cœur du contrôle cognitif, incluant les trois fonctions exécutives décrites par Miyake et collaborateurs (2000) à savoir la flexibilité mentale, le contrôle inhibiteur et la mise à jour. Le contrôle de l'effort, employé dans la littérature sur le tempérament est également au cœur de l'attention exécutive, tout comme la mémoire de travail, avec qui elle partage une part de variance commune (Kane et al., 2016; Posner et al., 2013b; Rothbart et al., 2007; Tiegio et al., 2020). L'ensemble des construits précédemment cités permettraient la mise en œuvre d'un contrôle cognitif efficient. L'autorégulation interviendrait au service du contrôle cognitif et de ses fonctions spécifiques selon le contexte et la tâche demandée pour produire ou modifier un comportement ou une pensée.

Notre modèle ne permet pas de représenter la trajectoire développementale de ces fonctions, qui auraient une base commune chez les très jeunes enfants et se spécifieraient au cours du développement durant la maturation et la spécialisation des réseaux cérébraux de l'attention (N. Garon et al., 2008; Wiebe et al., 2011).

4. Développement de l'attention exécutive

Des premières formes attentionnelles sont mises en évidence dès la naissance via les activations du réseau neural de la saillance permettant à l'enfant de diriger son attention de manière exogène (Uddin, 2017). Ce réseau neural va permettre la coordination d'autres réseaux neuronaux associés à l'attention exécutive, permettant ensuite un contrôle endogène de l'attention. L'attention exécutive se développe considérablement pendant la période préscolaire, avec la mise en œuvre de processus de plus en plus contrôlés, comme en témoigne la réussite à des tâches cognitives de plus en plus complexes (Rueda et al., 2005). Grâce à de nouvelles tâches adaptées aux très jeunes enfants et à l'apport des techniques de neuroimagerie, nous sommes en mesure d'obtenir une meilleure compréhension du développement précoce de

⁸ Nous utiliserons ainsi le terme d'attention exécutive tout au long de ce manuscrit en lien avec ce référentiel théorique.

l'attention exécutive et des fonctions associées, tant d'un point de vue comportemental que d'un point de vue cérébral (Fiske et Holmboe, 2019).

4.1. Les précurseurs de l'attention exécutive

Le réseau de la saillance, composé du cortex cingulaire antérieur dorsal et de l'insula antérieure bilatérale permet, d'un point de vue comportemental, de répondre aux stimulations saillantes de notre environnement (Seeley et al., 2007). Ce réseau neural s'inscrit dans les trois grands réseaux neuronaux impliqués dans l'émergence de capacités cognitives (Figure 7) avec le réseau de mode par défaut (*default mode network*), réseau actif lorsque le cerveau n'est pas engagé dans une tâche, et du réseau exécutif central (*central executive network*), actif lorsque le cerveau est engagé dans une tâche nécessitant de l'attention (Menon et Uddin, 2010). Le réseau de la saillance est impliqué dans l'implémentation du contrôle cognitif, mais également dans la coordination des réponses comportementales. Une activité accrue de ce réseau est mise en évidence dans des situations où un changement de comportement est nécessaire, notamment dans un contexte de détection d'erreur (Ham et al., 2013). Il agit en tant qu'interface, assurant une communication à plus grande échelle entre différents réseaux cérébraux impliqués dans l'attention d'orientation et l'attention exécutive (Uddin et al., 2011). Dès les premiers mois de vie, les activations de ce réseau permettent l'expression des premières formes d'attention exogène via l'attention d'alerte et l'attention d'orientation.

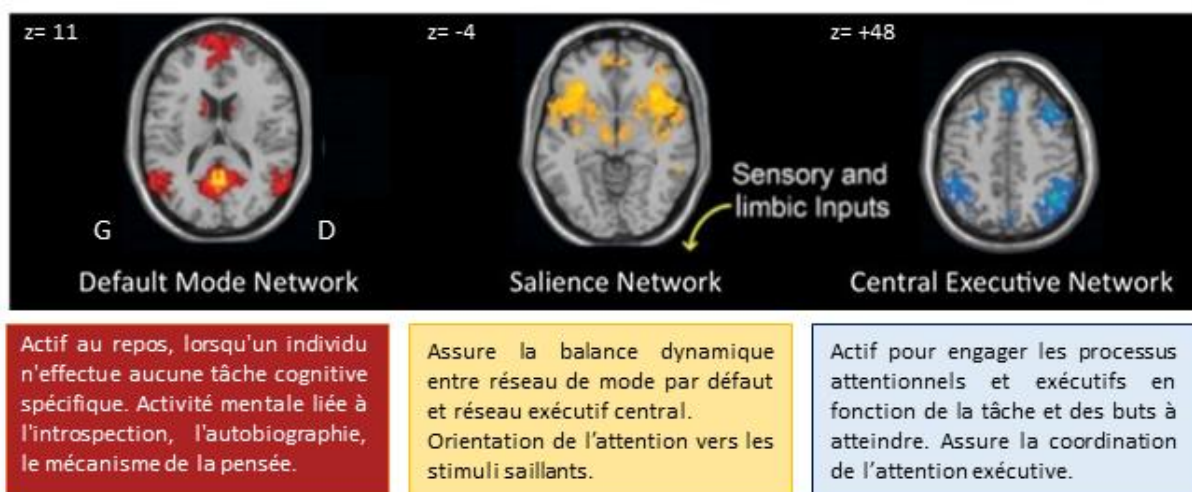


Figure 7. Les trois grands réseaux neuronaux impliqués dans la mobilisation des capacités cognitives : le **réseau de mode par défaut**, le **réseau de la saillance** et le **réseau exécutif central**. Adapté de Menon (2015).

L'état d'alerte est difficile à évaluer chez les nouveau-nés étant donné la présence plus élevée de périodes de sommeil, qui occupent près de trois quarts du temps (Berg et al., 1973). Au cours des trois premiers mois, des changements considérables s'opèrent d'un point de vue

chronobiologique et l'alternance veille-sommeil devient de plus en plus stable avec des périodes d'alerte plus longues (Richards, 2008). Des stimulations sensorielles tactiles ou vestibulaires associées à des activités courantes de soins peuvent activer l'état d'alerte via la vigilance visuelle (Geva et al., 1999). Les paradigmes évaluant l'attention sous le prisme de la modalité visuelle ont été les pionniers pour témoigner des premiers indicateurs de l'attention d'orientation d'un point de vue comportemental (Ruff et Rothbart, 1966).

Des formes rudimentaires d'attention exécutive sont observables dès l'âge de 4 mois, en lien avec l'émergence de l'attention d'orientation (Johnson et al., 1991). Les mesures de vitesse de traitement et d'efficacité oculomotrice permettent d'étudier les performances de nourrissons dans la recherche, la poursuite et le désengagement de cibles visuelles. On présente au nourrisson une cible centrale selon des modalités différentes : une cible périphérique apparaît en même temps que la cible centrale (condition interférence) ou la cible centrale disparaît pour laisser place à une cible périphérique (condition sans interférence). Entre 3 et 4 mois, les latences de déplacement du regard sont plus longues dans les conditions avec un distracteur périphérique autour de la cible (Hendry et al., 2016). Cette compétence progresse fortement au cours de la première année avec une diminution des latences de déplacement de regard entre les deux conditions. Par ailleurs, la capacité des nourrissons à désengager rapidement leur regard de cibles non pertinentes est associée à de meilleures capacités d'attention exécutive en période préscolaire (Cuevas et Bell, 2014). Ce résultat est concordant avec une autre étude longitudinale rapportant un lien entre l'attention visuelle à 5 mois et l'apprentissage de la lecture à 6 ans en lien avec la qualité du fonctionnement exécutif (Blankenship et al., 2019).

Bahrick et collaborateurs (2004) font l'hypothèse que c'est la redondance inter-sensorielle qui guiderait le développement de l'attention sélective et les premiers apprentissages. Les informations sensorielles présentées de manière redondante dans deux ou plusieurs modalités attireraient sélectivement l'attention sur les propriétés amodales et en améliorent l'apprentissage perceptif, tandis que les informations présentées via une seule modalité amélioreraient l'apprentissage perceptif des propriétés spécifiques à la modalité. Des travaux menés en psychologie du développement suggèrent que la redondance permettrait au cerveau d'extraire des éléments amodaux comme le tempo, le rythme, l'intensité ou la durée (Provasi et al., 2014). Cette capacité précoce serait critique pour le développement cognitif, moteur, émotionnel et social. Dans ce domaine, l'expression de réaction à la nouveauté est employée pour parler d'une orientation de l'attention vers une information nouvelle, que ce soit

un stimulus visuel, tactile ou auditif après une période de familiarisation (Pascalis et de Haan, 2003).

Durant la première année de vie, les nourrissons progressent considérablement dans leur capacité à diriger leur attention vers des stimuli et la maintenir (Ruff et Rothbart, 1966). Autour de 9 mois, les nourrissons deviennent de plus en plus en mesure de contrôler leur attention dans des tâches sollicitant la mise en œuvre de ces processus, que l'on peut commencer à tester car ils deviennent également capables de comprendre des règles simples énoncées ou montrées par un expérimentateur et de les appliquer (Conway et Stifter, 2012). L'une des tâches les plus connues est la tâche A non B associée à la permanence de l'objet. Cette tâche consiste à placer deux caches face à l'enfant, puis à placer un premier objet sous un premier cache, le cache A, plusieurs fois devant l'enfant. On invite ensuite l'enfant à découvrir lui-même l'objet sous ce premier cache. Une fois que l'enfant est familiarisé avec le but de la tâche, l'expérimentateur place l'objet sous un autre cache, le cache B, puis invite de nouveau l'enfant à découvrir l'objet caché. La réussite des tout petits dans cette tâche est associée à la mise en œuvre des premières manifestations comportementales d'attention exécutive, en lien avec l'activation précoce des régions dorsolatérales du cortex préfrontal (Cuevas et Bell, 2010).

L'utilisation de tâches ludiques informatisées permet de mieux comprendre les premiers stades du développement précoce de l'attention exécutive via le contrôle inhibiteur, en combinant mesures comportementales et mesures cérébrales chez de très jeunes enfants (Berger et al., 2000). Holmboe et collaborateurs (2008) ont développé une tâche informatisée, la tâche *Freeze-Frame*, permettant d'évaluer le développement du contrôle inhibiteur. Cette tâche a été proposée à partir de 9 mois, âge à partir duquel les nourrissons commencent à réussir la tâche A non B. Il est demandé aux participants d'inhiber leur tendance à regarder des distracteurs visuels périphériques présentés autour d'un stimulus central animé. Ce stimulus central pouvait varier entre les essais (condition essai avec cible intéressante) ou ne pas changer au cours de la tâche (condition essai avec cible ennuyeuse). Les résultats obtenus durant cette tâche mettent en évidence, dès 9 mois, la capacité des nourrissons à apprendre à inhiber des distracteurs visuels au cours de la tâche et de façon plus rapide lorsque les essais sont intéressants, il s'agit d'un apprentissage inhibiteur sélectif. Cette capacité d'inhibition sélective à 9 mois est fortement associée avec les performances dans une tâche de conflit spatial à 24 mois, et servirait de prédicteur de la capacité à résoudre des conflits cognitifs.

En continuité de ce travail de recherche, la même équipe a développé une tâche semblable sur tablette tactile, la *Early Childhood Inhibitory Touchscreen Task* (ECITT), permettant d'évaluer le développement du contrôle inhibiteur durant les deux premières années (Figure 8) (Holmboe et al., 2021). Dans cette tâche, les enfants doivent appuyer sur un bouton présentant un visage heureux afin de débloquer une animation récompense. Dans la majorité des essais, le visage heureux est présenté dans une localisation spatiale récurrente, c'est la condition prépondérante. De temps en temps dans la tâche, le visage heureux est présenté dans une autre localisation que celle utilisée de manière prépondérante. Dans cette condition inhibition, l'enfant doit changer sa tendance à répondre sur la localisation prépondérante pour appuyer sur le visage heureux. Les résultats obtenus ont mis en évidence un développement du contrôle inhibiteur, en particulier l'inhibition d'une réponse motrice entre 18 et 24 mois. Les enfants progressent significativement dans leur capacité à fournir des bonnes réponses entre les différentes conditions, avec une plus grande difficulté à inhiber les essais dans la condition inhibition à 18 mois mais des performances similaires dans les deux conditions à 24 mois. Concernant les temps de réaction, les enfants sont plus rapides à 24 mois dans la condition essai prépondérant que dans la condition essai inhibition, mais aucune progression développementale n'est constatée entre 18 et 24 mois, suggérant qu'à cet âge, cette variable n'est pas le meilleur indicateur développemental.

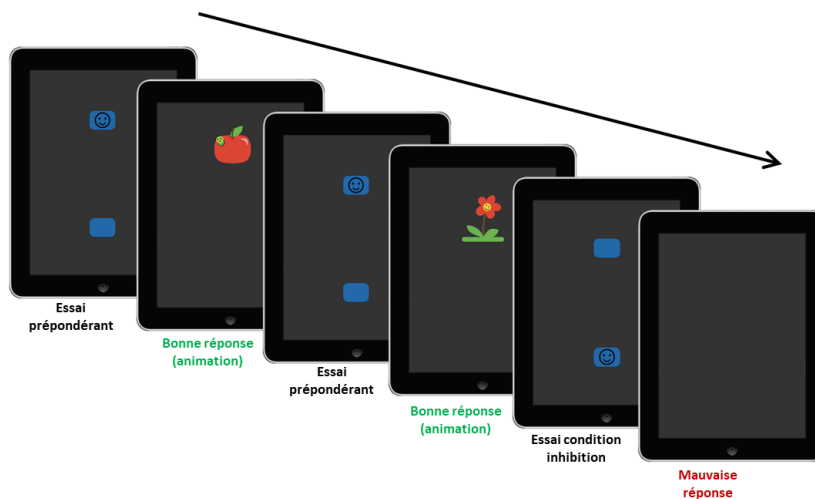


Figure 8. Protocole ECITT, adapté de Holmboe et al., (2021).

Cette tâche a ultérieurement été utilisée chez des nourrissons dès l'âge de 10 mois conjointement à des mesures cérébrales en spectroscopie dans le proche infrarouge (fNIRS). Cette étude menée auprès de 135 nourrissons a mis en évidence, dans les essais nécessitant une mise en œuvre du contrôle inhibiteur, des activations cérébrales semblables à celles observées chez les enfants et les adultes dans des régions frontales et pariétales du cortex cérébral (Fiske

et al., 2022). Ces résultats sont en accord avec des travaux précédents en EEG utilisant la tâche A non B chez des nourrissons (Cuevas et al., 2012). Dans cette étude, les changements d'activité cérébrale durant la tâche A non B permettent d'expliquer une part de variance dans la variabilité des performances à l'âge de 10 mois. Ces résultats témoignent de précurseurs de l'attention exécutive dès la seconde moitié de la première année de vie et d'une mise en œuvre progressive d'un contrôle endogène de l'attention.

4.2. Développement de l'attention exécutive chez les enfants d'âge préscolaire

Durant la période préscolaire, des progrès considérables dans les tâches de résolution de conflit cognitif sont observés, témoignant de la mise en œuvre du réseau exécutif. Ce dernier exerce un contrôle accru sur le réseau de la saillance, permettant à l'enfant de diriger son attention de manière endogène (Conejero et Rueda, 2017). On observe un développement rapide des capacités d'attention exécutive entre l'âge de 2 et 6 ans, associé à une progression du système de myélinisation qui augmente le rythme de transmission des messages neuronaux (Giedd et al., 1999; Kagan et Baird, 2004).

Les performances des enfants à la *Child-ANT*, version adaptée de l'ANT, témoignent du développement de l'attention exécutive chez des enfants âgés de 6 à 9 ans (Rueda, Fan, et al., 2004a). Dans cette tâche, les enfants ont pour consigne de repérer dans quelle direction nage le poisson cible, présenté en haut ou en bas de l'écran, en appuyant sur les touches d'un clavier, soit à droite, soit à gauche. Les stimuli cibles sont entourés de distracteurs, poissons nageant dans le même sens, il s'agit de la condition congruente, ou dans une direction contraire, il s'agit de la condition incongruente. En condition neutre, le stimulus n'est pas entouré de distracteurs. Les stimuli cibles peuvent être précédés d'indices, qui peuvent être présentés au centre de l'écran (indice central), en haut et en bas (double indice) ou bien donner une indication sur la localisation ultérieure des stimuli à l'écran (indice spatial) (Figure 9). Tout comme dans l'ANT, différentes soustractions à partir des temps de réaction dans les différentes conditions permettent d'obtenir une mesure de l'efficacité des trois réseaux attentionnels. Le pourcentage d'erreurs dans les différentes conditions est également pris en compte dans cette tâche. Les premières données recueillies ont permis de mettre en évidence un développement de l'attention exécutive entre l'âge de 6 et 10 ans avec une diminution globale des temps de réaction et du taux d'erreurs (Rueda, Fan, et al., 2004a). À partir de 7 ans, les performances des enfants à

gérer le conflit cognitif dans cette tâche (mesuré par les temps de réaction entre les conditions incongruentes et congruentes), sont semblables à celles d'adultes.

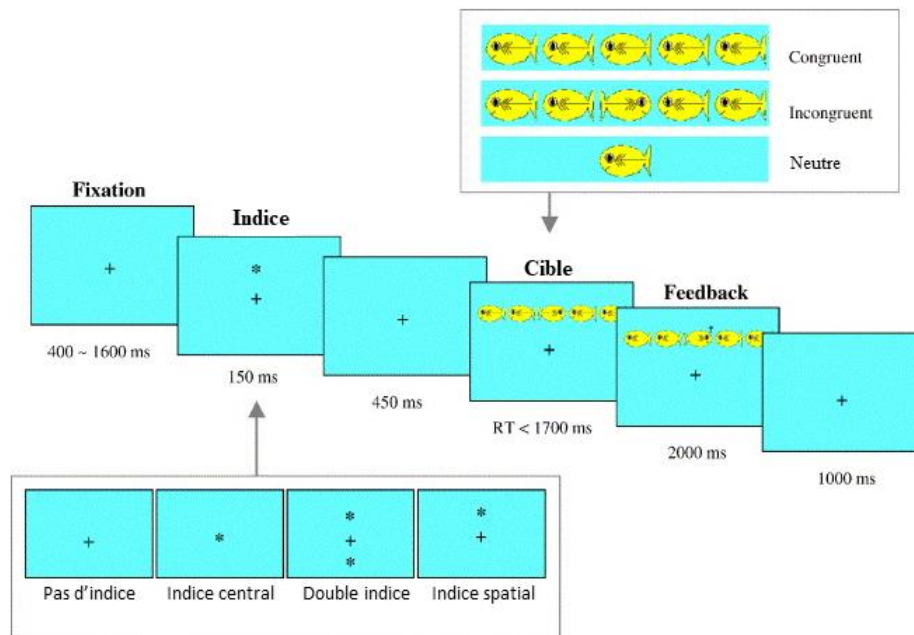


Figure 9. Protocole *Child-ANT*, adapté de Rueda *et al.*, (2004).

Combinée avec des mesures en EEG, la *Child-ANT* permet également de comprendre le développement de l'attention exécutive via les analyses des potentiels évoqués cérébraux observés spécifiquement dans ce type de tâche (N2, P3, LPC). Rueda et collaborateurs (2004) ont pu ainsi mettre en évidence auprès d'enfants de 4 ans en comparaison à des adultes, l'évolution temporelle des activations cérébrales concernant la gestion de conflit cognitif. Tout comme cela est observé d'un point de vue comportemental avec des temps de réaction plus longs chez les enfants, la latence des potentiels évoqués cérébraux est également plus longue chez les enfants en comparaison à des adultes. La localisation des potentiels évoqués est également plus diffuse chez les enfants de 4 ans par rapport aux adultes. L'effet de la congruence des stimuli observé via la modulation de la composante N2 en région frontale est faible chez les enfants de 4 ans et est davantage observé sur des composantes plus tardives comme la LPC à partir de 500ms post-stimuli. L'effet de la congruence observé sur une composante plus tardive chez les enfants est en lien avec le délai de réponse comportementale plus long par rapport aux adultes. Cette observation est également concordante avec un effet plus soutenu de la réponse P3 en région pariétale pour les essais incongruents, attestant d'un plus grand effort cognitif pour déterminer la bonne réponse. Ces résultats ont été reproduits et complétés dans des travaux ultérieurs utilisant également la *Child-ANT* (Abundis-Gutiérrez et al., 2014; Pozuelos et al., 2014).

Une version adaptée de cette tâche a été proposée pour des enfants plus jeunes, à partir de 3 ans (Casagrande et al., 2022). Dans cette tâche, l'information demandée n'est pas de discriminer la direction d'un animal au centre de l'écran, mais sa couleur, les distracteurs ayant des couleurs opposées. Dans cette étude, les enfants de 3 ans présentent des scores d'attention d'orientation significativement plus faibles que les enfants des autres groupes d'âge (4,5 et 6 ans), en accord avec l'hypothèse d'un changement développemental majeur entre l'attention d'orientation et l'attention exécutive. Concernant le score de conflit, mesuré par les différences de temps de réaction entre la condition incongruente et la condition congruente, on observe *a contrario* chez les enfants de 3 ans un score plus faible que chez les enfants plus âgés. Ce résultat contre-intuitif indiquerait que les plus jeunes enfants sont plus rapides à fournir une réponse en condition incongruente qu'en condition congruente, mais incapables de bénéficier de l'apport d'informations contextuelles comme le sens des *flankers* afin de moduler leur réponse comportementale.

D'autres tâches plus spécifiques⁹ permettent de témoigner d'une mise en œuvre des processus liés à l'attention exécutive via les mesures du contrôle cognitif chez les enfants d'âge préscolaire. Par exemple, la tâche *Dimensional Change Card Sorting task* (DCCS), adaptée de la tâche de tri de cartes du Wisconsin, est l'une des plus connues dans la littérature (Frye et al., 1995; Zelazo et al., 2003). La plupart des enfants de 3 ans échouent la seconde phase de cette tâche en persévérant sur les réponses données dans la phase précédente tandis qu'à 4-5 ans les enfants parviennent mieux à changer de stratégie entre les deux phases de l'épreuve (Zelazo, 2006). La tâche du Stroop animaux, destinée à évaluer le contrôle inhibiteur et adaptée de la tâche adulte de Stroop, met en évidence une progression de 3 à 6 ans dans la capacité à résister à l'interférence (Wright et al., 2003).

Pour résumer, l'ensemble des travaux de la littérature menée chez les enfants d'âge préscolaire témoigne d'un développement accru de l'attention exécutive durant cette période, tant d'un point de vue comportemental que d'un point de vue neural. Chevalier et Blaye (2006) suggèrent qu'il ne s'agit pas seulement de gains linéaires dans l'efficacité de ces processus mais plutôt d'interactions entre progrès conceptuels et exécutifs. La mise en œuvre de l'attention exécutive durant cette période est mise au profit de l'acquisition de compétences académiques fondamentales, contribuant fortement à la réussite scolaire ultérieure.

⁹ Une description plus exhaustive de tâches destinées aux enfants d'âge préscolaire sera fournie dans la partie contributions expérimentales de ce travail de thèse.

4.3. L'attention exécutive : un pilier pour les apprentissages scolaires

Une bonne efficacité de l'attention exécutive est une base fondamentale pour les acquisitions scolaires mais aussi une bonne régulation émotionnelle et l'intégration sociale (Rhoades et al., 2011; Rueda et al., 2010). L'attention exécutive permet à l'enfant d'avoir une posture adaptée en situation d'apprentissage et de mobiliser au bon moment les composantes cognitives nécessaires pour mémoriser des consignes, inhiber des distracteurs ou se focaliser sur le but d'une tâche donnée par exemple. Les enfants entrant à l'école primaire avec un bon contrôle cognitif auront de meilleures capacités d'apprentissage des compétences fondamentales que sont la lecture, l'écriture et les mathématiques (Best et al., 2009; Yeniad et al., 2013). De manière générale, l'efficacité des capacités de contrôle cognitif semble être un des leviers pour favoriser la réussite scolaire chez tous les élèves (Bryce et al., 2015) dès la période préscolaire (Diamond et al., 2007). Ainsi, l'efficacité de programmes d'entraînement de l'attention exécutive a été éprouvée dans un premier temps au sein de laboratoires de recherche, puis déployés au sein d'écoles afin de répondre, entre autres, aux problématiques d'échec scolaire dès le plus jeune âge.

Parmi les compétences fondamentales, la lecture est au cœur des enseignements scolaires. Afin de parvenir à une lecture fluide chez les jeunes lecteurs, différentes compétences sont mobilisées telles que la capacité de décodage des phonèmes et graphèmes, mais aussi l'accès à la compréhension du contenu par la conscience phonologique. La mise en œuvre de processus attentionnels contrôlés contribue à la vitesse de lecture mais aussi la compréhension du contenu (Johann et al., 2020). Par ailleurs les compétences précoces en littératie sont prédictives de la capacité à identifier des nombres et à compter à haute voix en période préscolaire (Thomas et Tazouti, 2021). Au travers d'une tâche impliquant des capacités de contrôle inhibiteur et d'autorégulation en situation motrice, la tâche *Head-Toes-Knees-Shoulders* (HTKS), McClelland et collaborateurs (2007) ont mis en évidence que les capacités d'enfants d'âge préscolaire à s'autoréguler prédisaient les capacités précoces en littératie, mais également les compétences en vocabulaire et les acquisitions mathématiques. Une étude française longitudinale utilisant la tâche HTKS conduite entre la grande section (GS) et le cours préparatoire (CP) a également mis en évidence un rôle important des capacités d'autorégulation en lien avec les apprentissages scolaires et le développement des compétences sociales (Hubert et al., 2015).

Concernant l'acquisition des habiletés arithmétiques (comptage, résolution de problèmes arithmétiques, géométrie), différentes fonctions exécutives associées à l'attention exécutive sont également sollicitées (Cragg et Gilmore, 2014). Dès la période préscolaire, les performances des enfants à une batterie de fonctions exécutives et aux mesures rapportées par les enseignants au travers de la BRIEF-P sont associées à la variabilité des performances en mathématiques à l'âge de 6 ans (Clark et al., 2010). Parmi les fonctions exécutives, le contrôle inhibiteur joue un rôle important dans les performances en mathématiques chez des enfants entre 2 ans et 5 ans (Espy et al., 2004). La mémoire de travail a également été amplement documentée dans la littérature en lien avec les performances en mathématiques. D'après Monette et collaborateurs (2011), cette relation peut s'expliquer par la nature même des tâches mathématiques que les enfants doivent accomplir. En effet, les situations de résolution de problèmes nécessitant des additions et des soustractions simples ne sont pas encore des apprentissages consolidés et automatisés, la charge mentale de mémoire de travail est par conséquent plus importante. L'étude longitudinale conduite par Viterbori et collaborateurs (2015), auprès d'une population d'enfants italiens d'âge préscolaire, a permis de dégager un facteur d'inhibition et un facteur de mémoire de travail-flexibilité associés aux performances en mathématiques en grade 1 et 3, respectivement l'équivalent du CP et du cours élémentaire niveau 2 (CE2). Une méta-analyse de 23 travaux a confirmé l'implication de la flexibilité cognitive concernant les performances en mathématiques et d'autant plus chez les jeunes enfants (Santana et al., 2022).

L'étude menée par Rueda et collaborateurs (2012), sur un entraînement informatisé de l'attention exécutive chez des enfants d'âge préscolaire (5 ans), a montré une amélioration de son efficience sur le plan comportemental et cérébral. Dans cette étude, 37 enfants ont passé une batterie de tests neuropsychologiques (K-ABC, tâche de délai de gratification et une tâche de tri de cartes) ainsi qu'une mesure en EEG pendant la passation de la *Child-ANT*. Les parents étaient également invités à compléter un questionnaire concernant le tempérament de l'enfant. Après cette première session, les enfants ont été répartis en deux groupes : un groupe expérimental bénéficiant d'un entraînement et un groupe contrôle sans entraînement. Les sessions d'entraînement pour les enfants du groupe expérimental se déroulaient à l'école, à raison de 2 sessions de 45 min par semaine pendant 5 semaines. Durant cette séance, différents exercices étaient proposés autour de quatre grands axes : anticipation, focus attentionnel, résolution de conflit et contrôle inhibiteur. Les enfants ont été invités à revenir au laboratoire pour effectuer les mêmes mesures qu'au pré-test une semaine puis deux mois après

l'entraînement. Les résultats de cette étude n'ont mis en évidence aucune différence significative concernant les performances à la *Child-ANT* entre les deux groupes expérimentaux, en revanche des différences significatives sont observées concernant l'activité électrophysiologique (Figure 10). L'effet des *flankers* sur l'amplitude des potentiels évoqués en région frontale est observable plus tôt dans le groupe ayant bénéficié de l'entraînement en comparaison du groupe contrôle et semble se maintenir dans le temps. Ainsi, l'entraînement permet une mise en œuvre plus rapide et plus efficiente des réseaux cérébraux associés à l'attention exécutive. Un effet bénéfique de l'entraînement est également observable sur les mesures d'intelligence fluide et de régulation des affects.

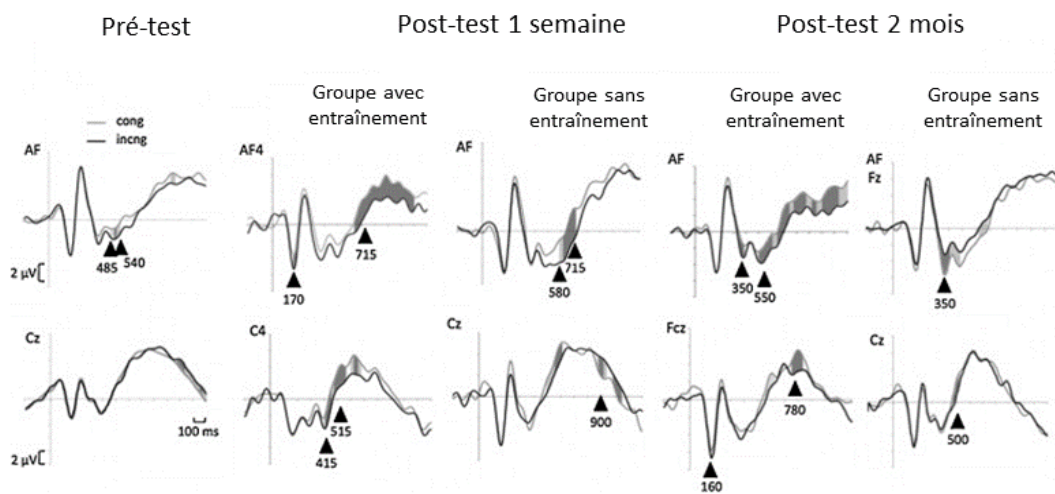


Figure 10. Tracé des potentiels évoqués cérébraux pour les essais congruents et incongruents en fonction du groupe expérimental, depuis la session pré-tests jusqu'aux deux post-tests. Les graphiques en haut mettent en évidence des électrodes en région frontales antérieures alors que les graphiques en bas montrent des canaux dans des régions fronto-postérieures (électrodes Fcz/Cz). Les zones grisées mettent en évidence des différences significatives entre les conditions congruents et incongruents. Traduit d'après la publication de Rueda et al. (2012).

Les bénéfices du programme d'entraînement ont également été testés avec l'apport d'un feedback métacognitif (Pozuelos et al., 2019). Dans cette étude menée auprès de 107 enfants, trois groupes de participants étaient répartis sur différentes séances d'intervention : un groupe d'entraînement de l'attention exécutive avec un feedback classique sur les tâches présentées, un groupe d'entraînement de l'attention exécutive avec une approche métacognitive et un groupe contrôle actif. Avant et après entraînement, les enfants recevaient une batterie d'évaluation neuropsychologique comprenant des sous-échelles de la batterie K-ABC, des subtests de la WISC évaluant la mémoire de travail et des tâches de laboratoire évaluant le contrôle inhibiteur. Ils étaient également invités à réaliser une tâche de *flankers* couplée à une mesure EEG, consistant à discriminer la forme d'un robot central (rond ou carré) en appuyant

sur la touche de clavier associée à la forme (Checa et al., 2014). Les robots *flankers* présentés aux côtés du robot central pouvaient ainsi avoir la même forme (condition congruente) ou une forme opposée (condition incongruente). Les enfants dans le groupe métacognitif ont reçu le même entraînement que les enfants du groupe entraînement classique avec en plus un soutien métacognitif individualisé. Le groupe contrôle actif a reçu une version non adaptative du programme d'entraînement, c'est-à-dire, sans niveau de difficulté progressif. Dix sessions d'entraînement de 45 minutes ont été réparties sur 4 semaines. Les résultats de cette étude mettent en avant des gains plus importants concernant les capacités de raisonnement fluide dans le groupe ayant bénéficié d'un étayage métacognitif, bien que le groupe entraînement classique ait également bénéficié des apports de l'entraînement. Si d'un point de vue comportemental, peu d'évolution sur la tâche de *flankers* a été remarquée, l'analyse des potentiels évoqués cérébraux associés à l'effet de conflit (congruent versus incongruent), a montré une différence entre les deux groupes. Dans le groupe ayant bénéficié d'un étayage métacognitif, les auteurs ont mis en évidence un effet plus précoce et plus important, concernant la déflexion positive suivant la réponse N2. Cette activation cérébrale liée à l'effet de l'entraînement permet de reproduire une activation cérébrale observée chez les adultes.

Le programme *Tools of the Mind*, visant à promouvoir le développement des fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire (Bodrova et Leong, 2018), a été déployé principalement aux Etats-Unis et plus récemment en France (Adam et al., 2022). Les activités proposées dans ce programme se basent sur du jeu de simulation sociale faisant appel à des situations écologiques, d'après les travaux menés par Vygotski dans une perspective socioculturelle. Ce programme, d'abord validé par des mesures effectuées en laboratoire, a ensuite été mis à l'épreuve en situation écologique, en classe, pour évaluer ses effets sur la progression des enfants d'âge préscolaire d'un point de vue académique mais également sur leurs compétences sociales et émotionnelles (Blair et al., 2018). Sur un essai contrôlé randomisé auprès de plus de 350 enfants d'âge préscolaire, le programme a permis d'améliorer les capacités d'écriture et de lecture, mais également les capacités d'auto-régulation et le recours à davantage d'activités de partage avec les pairs (Diamond et al., 2019). Des travaux semblables utilisant l'outil *Tools of the Mind* ont également été proposés dans des classes de maternelle en France situées en zone d'éducation prioritaire (Adam et al., 2022). Les enfants participant à l'étude ont été évalués 6 semaines avant le début du programme et 6 semaines après l'entraînement. Les évaluations comprenaient différents types de mesures incluant l'intelligence fluide, le vocabulaire, le contrôle inhibiteur moteur et le contrôle cognitif. La

tâche de contrôle cognitif était associée à une mesure des potentiels évoqués cérébraux en EEG. Les parents étaient également invités à compléter des questionnaires concernant les capacités d'autorégulation en situation écologique. Les résultats de cette étude, pionnière dans le domaine en France, ont mis en évidence une amélioration des capacités d'autonomie des enfants en contexte de jeu. En revanche, les auteurs ne sont pas parvenus à mettre en évidence des modifications des capacités de contrôle cognitif tant d'un point de vue comportemental qu'au niveau de l'activité cérébrale. Ces résultats soulèvent la question de la mise en œuvre de tâches permettant le transfert des capacités de contrôle cognitif telles qu'elles sont mesurées en laboratoire, en milieu écologique.

D'autres méthodes non informatisées ou basées sur des activités sportives et de méditation ont également montré des effets positifs pour améliorer les capacités de contrôle cognitif dès le plus jeune âge (Diamond et Lee, 2011). Cependant, les travaux menés dans ce champ peinent à montrer un transfert à long terme et de nombreuses variables externes peuvent modifier les performances exécutives de l'individu (Diamond et Ling, 2016). Parmi ces différentes variables, le milieu socio-économique est un facteur de risque ou d'opportunité pour la réussite scolaire dès la période préscolaire (Noble et al., 2006).

Les études menées en psychologie du développement ou en psychologie cognitive tendent à montrer que les enfants n'ont pas tous les mêmes compétences d'attention exécutive dès la période préscolaire. Les enfants les plus en difficulté à mobiliser leurs capacités attentionnelles sont davantage à risque d'échec scolaire. Il convient donc dès le plus jeune âge d'identifier l'origine des troubles de l'attention, partie prenante des troubles neurodéveloppementaux.

Résumé du Chapitre 1

L'attention est un construit multidimensionnel ayant fait l'objet de nombreux modèles théoriques en psychologie. Parmi ces modèles, le modèle proposé par Posner et Petersen (1990) distingue trois fonctions attentionnelles associées à des réseaux cérébraux spécifiques. L'attention exécutive, l'une des fonctions attentionnelles de ce modèle, est un construit au cœur de la cognition. Elle est essentielle au contrôle cognitif des pensées et des comportements, incluant les fonctions exécutives, et partage une part de variance commune avec le contrôle de l'effort, construit associé au tempérament, et la mémoire de travail. L'attention exécutive permet également l'autorégulation des pensées et des comportements.

Des précurseurs de l'attention exécutive sont observables dès les premiers mois de vie par la perception des informations saillantes provenant de l'environnement, qui témoignent d'une mise en œuvre de processus attentionnels endogènes via l'attention d'alerte et l'attention d'orientation (les deux autres composantes du modèle de Posner et Petersen, 1990). Ces manifestations comportementales sont en lien avec le développement du réseau neural de la saillance, permettant une attention endogène dès le plus jeune âge et assurant progressivement un rôle d'interface entre les réseaux neuronaux impliqués dans l'attention exécutive.

C'est durant la période préscolaire que des changements importants s'opèrent, avec une mise en œuvre d'une attention dite endogène permettant à l'enfant d'assurer un contrôle volontaire de son attention en fonction de ses buts et objectifs à atteindre. C'est aussi à cette période que les différences interindividuelles en termes d'attention exécutive peuvent déjà prédire la trajectoire développementale ultérieure, avec un risque plus accru de troubles de l'attention, au cœur de la symptomatologie des troubles neurodéveloppementaux.

Chapitre 2

L'attention exécutive au sein des troubles neurodéveloppementaux

« Tous ceux qui errent ne sont pas perdus. »

J.R.R Tolkien (1954)

Chapitre 2 - L'attention exécutive au sein des troubles neurodéveloppementaux

1. Introduction

La prévalence des troubles neurodéveloppementaux (TND) dans les pays occidentaux est en constante augmentation (Elsabbagh et al., 2012; Zablotzky et al., 2017). Ces troubles touchent en France près de 5% de la population, représentant environ 35 000 naissances par an (HAS, 2018). D'après le *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* dans sa 5^e édition (DSM-5), ces troubles apparaissent tôt au cours du développement, souvent même avant que l'enfant n'entre à l'école primaire, et se caractérisent par des atypies du développement qui altèrent le fonctionnement personnel, social, scolaire ou professionnel. La définition proposée dans la Classification Internationale des Maladies dans sa 11^e édition (CIM-11) rejoint celle présentée dans le DSM-5, notamment sur les retentissements dans différentes sphères de fonctionnement de l'individu. On retrouve parmi ces troubles : le trouble du spectre de l'autisme (TSA), le trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H), les troubles des apprentissages (TDA), les troubles moteurs et de la coordination, les troubles du langage, les handicaps intellectuels (notamment la déficience intellectuelle) mais également d'autres troubles non spécifiés. Lorsque l'on évoque les troubles de l'attention, c'est au TDA/H que l'on pense en premier lieu, véritable trouble de l'attention par essence. Toutefois, des altérations de l'attention sont présentes dans la plupart des TND (Ewen et Shapiro, 2005).

Au sein de ce chapitre, nous allons aborder spécifiquement les déficits d'attention exécutive exprimés au sein de trois exemples de TND (TDA/H, TSA et TDA). Nous discuterons de la multiplicité des facteurs de risque associés à l'expression d'un TND et aborderons un facteur de risque à part entière, la naissance prématurée. Enfin, conformément aux recommandations de bonnes pratiques formulées par l'HAS en 2020, nous soulignerons l'intérêt de repérer précocement les enfants à risque de TND afin d'optimiser le parcours de soins et de prise en charge. Cette dernière partie nous permettra de discuter des outils et programmes existants afin de remédier aux difficultés cognitives rapportées dans ces troubles et d'ouvrir des perspectives quant à la pertinence d'adopter une approche cross-syndromique pour appréhender les TND chez l'enfant. Cette approche, défendue par Karmiloff-Smith (Farran et Karmiloff-Smith, 2011; Karmiloff-Smith, 2009), encourage les chercheurs à étudier les symptômes présents dans les différents TND de façon transversale afin de comprendre les mécanismes cognitifs en jeu dans le développement de troubles spécifiques.

2. L'attention exécutive : une composante commune des troubles neurodéveloppementaux

Les troubles de l'attention exécutive sont au cœur de la symptomatologie des TND (Fabio et Urso, 2014). Parmi ces troubles, le TDA/H est par essence un trouble majeur de l'attention exécutive avec des difficultés d'inhibition, de régulation comportementale et émotionnelle s'exprimant par des comportements impulsifs et parfois une hyperactivité. On retrouve également des dysfonctionnements attentionnels au sein de la symptomatologie du TSA avec des déficits au niveau de l'attention exécutive et de l'attention d'orientation, qui entraînent également en cascade des déficits de certaines fonctions exécutives (Hill, 2004). Ces troubles attentionnels sont également exprimés au sein des TDA avec des difficultés à mobiliser des composantes du contrôle cognitif, essentielles pour les apprentissages et la réussite scolaire (Mazeau et al., 2021).

2.1. Attention exécutive et trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité

2.1.1. Caractéristiques et prévalence du TDA/H

Le tableau clinique du TDA/H est présenté dans le DSM-5 selon différents critères en fonction de l'expression du trouble sous une forme d'inattention et/ou d'hyperactivité-impulsivité. Les symptômes apparaissent au cours de la période scolaire (avant l'âge de 12 ans) et sont présents dans différentes sphères (maison, école, activités extra-scolaires). Différentes formes cliniques du TDA/H peuvent s'exprimer : une forme mixte comprenant des symptômes d'inattention et d'hyperactivité/impulsivité, une forme avec des symptômes d'inattention prédominants et une forme avec des symptômes d'hyperactivité/impulsivité prédominants.

Dans le monde, les différentes études menées estiment la prévalence du TDA/H autour de 5 % chez les enfants (Polanczyk et al., 2007) et 2,5 % chez les adultes (Simon et al., 2009). Des données plus récentes revoient ces chiffres à la hausse avec une incidence globale oscillant entre 5% et 11% en fonction des pays (Francés et al., 2022). En France, la prévalence du TDA/H chez des enfants entre 6 et 12 ans est estimée entre 3.5% et 5.6% d'après des données récoltées par enquête téléphonique en 2008 (Lecendreux et al., 2011). Parmi les différentes formes du TDA/H, 45,5% présentaient une dominante inattention, 35,9% une dominante hyperactivité-impulsivité et 17,6% présentaient une forme mixte. Il est toutefois intéressant de noter des divergences concernant les données de prévalence en France, en fonction des critères de mesure

utilisés et de la méthode diagnostique et de recherche employée pour obtenir ces données. Une étude menée par Ponnou (2020) a croisé les données françaises concernant la prévalence et le ratio d'enfants présentant un TDA/H traités par psychostimulant (méthylphénidate) avec les informations disponibles dans la base de données de l'assurance maladie concernant la prescription de méthylphénidate. Ainsi, les résultats précédemment cités, en lien avec les industries pharmaceutiques semblent présenter des faiblesses méthodologiques et des conflits d'intérêt. Les associations de parents ayant un fort poids médiatique et politique en France¹⁰ présentent une prévalence chez les enfants d'âge scolaire à partir des données publiées par Lecendreux et collaborateurs. À notre connaissance, il n'existe aucune étude récente en France permettant une nouvelle estimation de la prévalence du TDA/H chez les enfants de cette tranche d'âge.

Différentes trajectoires développementales du TDA/H sont identifiées sur un continuum allant d'une aggravation des symptômes jusqu'à une diminution voire une disparition des symptômes à l'adolescence (Sasser et al., 2016). Par ailleurs, le risque de comorbidité avec d'autres TND est extrêmement élevé chez les patients présentant un TDA/H (Antshel et Russo, 2019 ; Faraone et al., 2017 ; Ghirardi et al., 2018). On retrouve également un risque accru chez les patients TDA/H de troubles des conduites pouvant se manifester par des troubles oppositionnels avec provocation, des conduites à risque ou bien des comportements agressifs et anti-sociaux (Groenman et al., 2017 ; Kessler et al., 2014). Des troubles anxieux sont également fréquemment rapportés ainsi qu'un risque plus accru de dépression (Schatz et Rostain, 2006). Des difficultés de régulation émotionnelle sont également relevées dans certaines études en utilisant les échelles employées pour qualifier le tempérament au travers du contrôle de l'effort (Martel et Nigg, 2006 ; Nigg et al., 2004). Quelle que soit l'expression des différents symptômes, ceux-ci altèrent la qualité de vie dans différents contextes, notamment dans les interactions sociales (Heiman, 2005). Le trouble a également un retentissement important sur les apprentissages scolaires et ultérieurement dans le domaine professionnel si le trouble persiste (Mayes et al., 2000).

Les données de la littérature rapportent un décalage de plusieurs années entre les premières inquiétudes parentales, l'évaluation et le diagnostic aboutissant à une prise en charge (Connor, 2002). Il est difficile de procéder à un diagnostic dès les premières années de vie de l'enfant, toutefois certains signes d'alerte sont à prendre en compte et doivent interpeler parents, enseignants et professionnels de santé. Une étude longitudinale menée par Overgaard et

¹⁰ Parmi ces associations, HyperSupers TDA/H France : <https://www.tdah-france.fr/>

collaborateurs (2014) a mis en évidence une continuité entre les premiers signes du TDA/H exprimés à 18 mois (anxiété élevée et difficultés de régulation émotionnelle) et leur évolution à 3 ans ½. Chez les enfants d'âge préscolaire, on retrouve également une labilité émotionnelle plus fréquente chez les enfants présentant des symptômes du TDA/H (Overgaard et al., 2018). Ces constats suggèrent qu'une réactivité émotionnelle extrême (positive ou négative) dès les premières années de vie perturberait la mise en œuvre d'un contrôle cognitif efficient, ce qui en cascade impacterait également les capacités d'auto-régulation et les fonctions exécutives (Nigg et al., 2004). De manière générale, la prise en compte dès le plus jeune âge de l'hétérogénéité des différents symptômes semble offrir des pistes prometteuses pour proposer des interventions précoces afin de réduire l'impact ultérieur des symptômes du TDA/H sur la trajectoire développementale de l'individu (Nigg et al., 2020).

2.1.2. Troubles de l'attention au cœur du TDA/H

Les troubles de l'attention sont par définition au cœur de la symptomatologie du TDA/H. Les premiers travaux autour du TDA/H ont émergé au début du XX^e siècle et ont décrit les symptômes comme résultant de pauvres capacités d'inhibition ainsi que de difficultés de régulation comportementale. Les travaux menés par Douglas ont permis de davantage théoriser la symptomatologie du TDA/H (Douglas, 1999, 2005; Douglas et Peters, 1979) en décrivant quatre types de symptômes associés à des difficultés à s'autoréguler: un moindre maintien de l'effort, une modulation déficiente de la vigilance, une forte tendance à rechercher un renforcement immédiat ainsi que des difficultés à contrôler les comportements impulsifs. Ces conceptions théoriques ont cependant fait l'objet de peu d'études et la théorie d'une faible inhibition comportementale en lien avec le fonctionnement exécutif a émergé dans la littérature (Barkley, 1997).

Les symptômes exprimés dans le TDA/H seraient liés à un déficit primaire d'inhibition comportementale selon Barkley (1997), dont les travaux demeurent encore une référence dans la clinique du TDA/H. L'inhibition comportementale, telle qu'elle est décrite selon cette perspective théorique, englobe trois processus : l'inhibition d'une réponse automatique, l'interruption d'une réponse en cours (contrôle de l'erreur) et la résistance aux interférences. En effet cascade, ce déficit entraînerait d'autres dysfonctionnements exécutifs dans quatre domaines : la mémoire de travail non verbale, le langage internalisé, l'autorégulation (émotionnelle et comportementale) et la reconstitution (mise en œuvre de stratégies dans différents contextes pour être adapté aux changements de son environnement). Cette conception

permet de témoigner des nombreuses altérations exécutives rapportées dans le trouble : des difficultés à inhiber une réponse dans des tâches type Stroop (Sørensen et al., 2014), un défaut de flexibilité dans des tâches de tri type Wisconsin et la capacité à manipuler des informations en mémoire de travail (Ramos et al., 2020). Si les travaux de Barkley témoignent de l'ensemble des troubles cognitifs rapportés dans le TDA/H, ils ne permettent pas de témoigner des autres altérations comme l'impulsivité qui est une caractéristique majeure du trouble. Ils ont toutefois permis le développement de premières interventions psychothérapeutiques conjointement aux traitements pharmacologiques (Barkley, 2004).

Les travaux de Sonuga-Barke proposent une autre conception du TDA/H, avec le modèle d'aversion du délai qui vient compléter les manquements relevés dans le modèle de Barkley (Sonuga-Barke, 2002). L'aversion du délai prédit que dans des tâches où le sujet est confronté à une réponse immédiate ou différée, les patients présentant un TDA/H vont préférer donner une réponse immédiate (Sonuga-Barke et al., 1992). Ce modèle à double voie, la voie de la récompense différée et la voie de la réponse inhibée, se distingue en fonction des symptômes, des profils cognitifs et motivationnels ainsi que des origines génétiques et non-génétiques. Dans la voie de la récompense différée, le sujet va être en difficulté à gérer la gratification. Dans des tâches où le sujet est confronté à un choix, l'aversion du délai signifie que l'attente est tellement aversive que le sujet va préférer choisir rapidement (impulsivité) au détriment du bénéfice à long terme (réussite par exemple). Dans la voie de la réponse inhibée, la situation aversive incite le sujet à orienter son attention vers des stimuli non temporels (inattention), se traduisant par une agitation (hyperactivité) (Figure 11). Les comportements rapportés dans le TDA/H résulteraient davantage d'un style motivationnel différent (aversion du délai) découlant d'atteintes du réseau cérébral de la récompense. Ce modèle permet de témoigner de l'hétérogénéité des symptômes en lien avec des dysfonctionnements de circuits neuronaux (Sonuga-Barke, 2005).

Ce modèle à double voie a été testé auprès de profils hétérogènes de patients présentant un TDA/H et de patients contrôles âgés de 6 à 17 ans à l'aide une batterie de tests neuropsychologiques permettant d'évaluer le contrôle inhibiteur, l'aversion du délai et le traitement temporel de l'information. Les résultats de cette étude mettent en évidence avec des profils de patients présentant un TDA/H hétérogènes, pouvant être affectés dans un seul des trois domaines évalués (Sonuga-Barke et al., 2010). Ils soulignent ainsi les limites du modèle à double voie du TDA/H et mettent en évidence de multiples médiateurs neurobiologiques,

psychologiques et environnementaux dans le développement de la symptomatologie du TDA/H (Sonuga-Barke et Halperin, 2010).

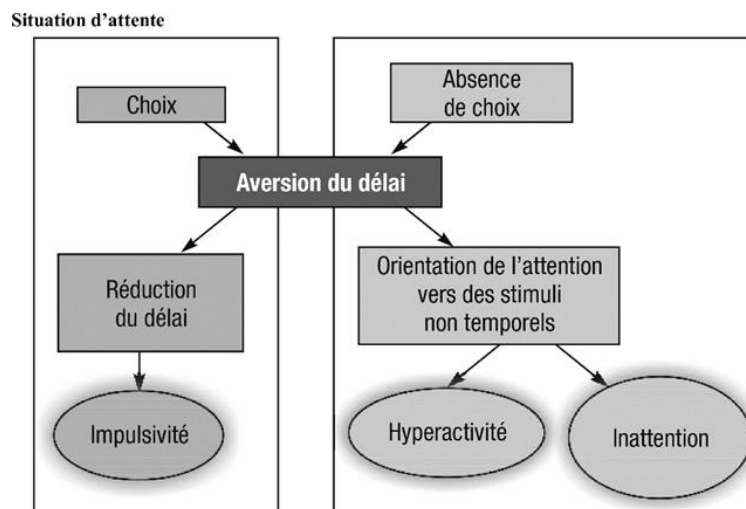


Figure 11. Schéma de l'aversion du délai d'après Sonuga-Barke, traduit par Gaillac et Vera (2016).

Les enfants présentant un TDA/H ont de manière générale des performances plus faibles que leurs pairs sans trouble sur des tâches mobilisant le contrôle cognitif, et présentent des profils très hétérogènes dans leurs performances (Lambek et al., 2011). Concernant l'attention exécutive, Mullane et collaborateurs (2011) ont employé une version adaptée de l'ANT, l'ANT-I¹¹ pour comparer les performances des enfants présentant un TDA/H (avec des formes mixtes ou avec inattention dominante) avec leurs pairs asymptotiques. Les auteurs ont mis en évidence des temps de réaction plus longs pour traiter les stimuli incongruents chez les enfants présentant un TDA/H quelle que soit la forme exprimée. En revanche, contrairement à leurs hypothèses, il n'y a pas de différence entre les enfants présentant un TDA/H et les enfants asymptotiques concernant le nombre d'erreurs commises en condition incongruente, ce qui suggère qu'à performance égale, il faut davantage d'effort cognitif aux enfants présentant un TDA/H pour parvenir à produire la bonne réponse. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Konrad et collaborateurs (2006) qui décrivent, d'un point de vue comportemental, une différence significative entre les temps de réaction des conditions congruentes et incongruentes chez les enfants présentant un TDA/H. Une autre étude employant la *Child-ANT* ne met pas en évidence de différence significative entre les groupes d'enfants présentant un

¹¹ L'ANT-I est une tâche informatisée qui combine des essais avec des *flankers* (5 flèches présentées à l'écran dans des conditions congruentes ou incongruentes) et des essais de type *Simon task* (une seule flèche présentée soit de façon congruente avec sa localisation spatiale, soit de façon incongruente avec sa localisation spatiale). Cette version a été employée par Callejas et collaborateurs (2004) pour tester les interactions entre les trois réseaux attentionnels. Pour plus d'informations : <http://www.ugr.es/~anti/Presentation.html>

TDA/H et le groupe contrôle d'enfants sans trouble concernant les temps de réaction entre les conditions congruentes et incongruentes (Booth et al., 2007). Ces non-résultats sont probablement le reflet de l'hétérogénéité des profils de patients présentant un TDA/H qui inclut les profils sans symptômes d'hyperactivité, davantage touchés par une lenteur dans la vitesse de traitement et de faibles niveaux de vigilance (Barkley et al., 1990) et les profils avec hyperactivité qui sont davantage entravés dans la mobilisation de l'attention exécutive (Carlson et Mann, 2000). Il est donc primordial de tenir compte du profil de patients présentant un TDA/H inclus dans les études, car leurs profils cognitifs sont eux aussi différents.

Concernant les aspects neurocognitifs rapportés chez les patients présentant un TDA/H, des déficits d'activations des réseaux de l'attention exécutive sont relevés au niveau du cortex cingulaire antérieur, du cortex préfrontal dorsolatéral, des ganglions de la base et du thalamus (Dickstein et al., 2006). Dans une version modifiée de l'ANT, Konrad et collaborateurs (2006) ont mis en évidence des différences d'activations cérébrales entre les conditions congruentes et incongruentes. Les enfants présentant un TDA/H ont une diminution d'activité du gyrus précentral et du putamen en condition incongruente, contrairement aux enfants ne présentant pas de trouble et chez qui on enregistre un signal BOLD¹² accru. De plus, les enfants présentant un TDA/H mobilisent le cortex pariétal supérieur médial gauche, contrairement aux enfants sans trouble. Plusieurs études ont mis en avant une connectivité dysfonctionnelle entre le réseau du contrôle exécutif et le réseau du mode par défaut chez les enfants et adolescents présentant un TDA/H (Castellanos et al., 2008; Fair et al., 2010; Rubia, 2011; Rubia et al., 2009). Cai et collaborateurs (2021) ont également montré des anomalies de la connectivité fonctionnelle entre le réseau exécutif central et le réseau de la saillance dans une tâche de type *Go/No Go*. Ces anomalies de connectivité étaient par ailleurs corrélées aux altérations cognitives et mesures cliniques d'inattention.

2.2. Attention exécutive et trouble du spectre de l'autisme

2.2.1. Caractéristiques et prévalence du TSA

D'après le DSM-5, le TSA fait référence à un ensemble de troubles dont l'apparition survient durant la période précoce du développement. Il se caractérise par une atteinte des capacités de communication et d'interaction sociale. Il est également marqué par l'expression d'intérêts restreints ainsi que d'activités et comportements répétitifs. Le terme de spectre est

¹² Le signal BOLD permet de mesurer les variations d'oxygénation cérébrale.

employé pour refléter la vaste hétérogénéité du trouble. Par ailleurs, il recouvre les troubles antérieurement qualifiés sous d'autres dénominations tels que l'autisme infantile précoce, l'autisme de Kanner, l'autisme à haut niveau de fonctionnement, l'autisme atypique, le trouble envahissant du développement non spécifié, le trouble désintégréatif de l'enfance et le syndrome d'Asperger.

La description des premiers signes de TSA représente actuellement un des principaux axes de la recherche sur l'autisme (Elsabbagh et al., 2012; Jones et al., 2014). Dans le monde, des données récentes estiment la prévalence du TSA à 1 cas pour 100 naissances (Zeidan et al., 2022). Aux Etats-Unis, d'après une étude menée en 2018 dans 11 états différents, la prévalence chez les enfants âgés de 8 ans variait entre 16.5 à 38.9 cas pour 1000 habitants et était davantage élevée chez les garçons que chez les filles (Maenner et al., 2021). Cette prévalence est en constante hausse, notamment en raison des progrès qui ont été faits ces dernières années concernant le dépistage précoce du trouble et l'apport de données épidémiologiques dans certaines régions du globe qui étaient peu représentées comme le Moyen Orient (Alshaban et al., 2019) ou l'Afrique (Chinawa et al., 2016; Pillay et al., 2021).

En France, la cohorte ELENA¹³ dont le suivi est en cours, a recruté plus de 800 enfants ayant un diagnostic de TSA entre 2013 et 2019 (Baghdadli et al., 2014; Baghdadli et al., 2019). Cette étude inclut des enfants et adolescents âgés de moins de 16 ans, recrutés dans des centres spécialisés pour l'évaluation des TSA, qui sont suivis tous les 18 mois pendant au minimum 36 mois et au maximum 10 ans. Les chercheurs et praticiens impliqués dans l'étude recueillent des données cliniques, sociales, environnementales, génétiques, et familiales concernant l'enfant, permettant ainsi de mieux déterminer certains facteurs dans la symptomatologie et l'évolution du TSA. De plus, le programme de recherche national pluridisciplinaire MARIANNE¹⁴, lancé en 2022, va permettre de constituer une base de données pour comprendre les interactions multiples des facteurs génétiques, biologiques et environnementaux dans la survenue de TND, en particulier le TSA. Dès le 2^e trimestre de grossesse, les familles souhaitant participer à l'étude peuvent être incluses. Le suivi, qui dure jusqu'aux 6 ans de l'enfant, comporte des questionnaires, des entretiens avec un psychologue et des prélèvements biologiques non invasifs (cheveux, ongles) au cours de périodes clés du développement de l'enfant.

Les études rétrospectives menées à partir de films familiaux ont également permis d'apporter certaines nuances dans la compréhension de l'apparition des symptômes et de leur

¹³ Pour plus d'informations : <https://elena-cohorte.org/>

¹⁴ Pour plus d'informations : <https://cohorte-marianne.org/>

développement (Adrien et Gattegno, 2004; Brisson et al., 2011). Il s'agit de vidéos spontanées, faites par les familles, réalisées avant toute expression du syndrome clinique d'autisme (Wendland et al., 2010). Les films familiaux peuvent être complexes à interpréter et n'exposer qu'une portion limitée des comportements manifestés par l'enfant. Toutefois, leur analyse permet de repérer des signes précoces du TSA dans des situations du quotidien comme, par exemple, les interactions sociales, les échanges de regards vers autrui ou vers des objets ou bien les vocalisations. Ces études ont mis en évidence certaines caractéristiques faisant signe d'alerte dans la communication et les interactions. On note, entre autres, des difficultés de pointage, d'attention conjointe et de maintien du regard social, des difficultés à répondre à son prénom, mais également des particularités sensorielles et motrices (Baranek, 1999; Garry et al., 2015; Saint-Georges et al., 2013). L'apparition de ces signes d'alerte dès la première année de vie est souvent associée à une aggravation des manifestations cliniques au cours du développement dans les différents environnements de l'enfant (crèche, école, loisirs, domicile familial). Différents modèles théoriques ont décrit le fonctionnement cognitif des personnes présentant un TSA, la plupart impliquant la mise en œuvre de processus attentionnels qui sont dans certaines situations déficitaires et dans d'autres optimisés, cela en fonction de l'expression clinique du trouble.

2.2.2. Troubles de l'attention dans le TSA

Les travaux de Baron-Cohen suggèrent le dysfonctionnement d'un module spécifique dédié à la lecture des états mentaux : la théorie de l'esprit (Baron-Cohen, 1989; Baron-Cohen et al., 1999; Baron-Cohen et al., 1985). Les personnes présentant un TSA auraient un déficit de mentalisation, comme une forme de « cécité mentale » dans des situations socio-cognitives. Les auteurs ont utilisé des tâches de fausses croyances comme la tâche de Sally et Anne pour mettre en évidence les difficultés à identifier les états mentaux d'autrui. Les deux poupées ont chacune respectivement un panier à côté d'elles et une boîte. Sally place une bille dans son panier puis quitte la scène et pendant ce temps, Anne récupère la bille pour la cacher dans sa boîte. À la question « Où Sally va-t-elle chercher la bille à son retour ? », si les répondants indiquent le panier, alors ils réussissent à attribuer la fausse croyance. Les personnes présentant un TSA peinent à apprécier la localisation de la bille du point de vue de Sally, et prennent en compte leur propre connaissance de la situation en répondant que Sally va chercher dans la boîte d'Anne (Baron-Cohen et al., 1985). Ces résultats ont été répliqués dans d'autres travaux basés sur un

paradigme semblable et également dans des tâches de faux-pas sociaux (Baron-Cohen, 1991; Happé, 1995). Cette perspective soutient également le traitement atypique des informations concernant les visages humains, compétence essentielle dans la cognition sociale (Valeri et Speranza, 2009).

La théorie de la faible cohérence centrale suggère que les patients présentant un TSA auraient des difficultés à regrouper différentes informations pour les traiter comme un tout afin de former un ensemble cohérent et sensé (Frith et Happé, 1994). Ils auraient plutôt une tendance spontanée au traitement local de l'information au détriment du traitement global. Il s'agirait d'un style cognitif différent, qui expliquerait le traitement de l'information de façon atypique dans différents domaines, et pouvant expliquer le cas de certains profils ayant des compétences exceptionnelles en musique ou en mathématiques par exemple (Happé, 1999).

Un déficit des fonctions exécutives est également rapporté chez les patients présentant un TSA (Ozonoff et al., 1993). Ozonoff et Jensen (1999) ont qualifié les performances d'enfants présentant un TSA en comparaison à des enfants présentant un autre TND et des enfants neurotypiques. Dans la tâche de tri de cartes du Wisconsin, les enfants présentant un TSA sont en difficulté pour passer d'une règle à une autre et commettent davantage d'erreurs que les enfants neurotypiques et les enfants présentant d'autres troubles, les auteurs relevant également une très grande variance dans le groupe d'enfants présentant un TSA (Figure 12A). Concernant l'épreuve de la Tour de Hanoi, les enfants présentant un TSA ont des capacités de planification altérées contrairement à leurs pairs au développement typique mais également à ceux avec autres troubles (Figure 12B).

Des perspectives théoriques plus récentes tentent de témoigner des spécificités cognitives et comportementales rapportées chez les patients présentant un TSA en suggérant un fonctionnement atypique mais pas forcément pathologique (Mottron et Burack, 2001). L'approche de Mottron se distingue par la mise en avant d'une neurodiversité chez les patients présentant un TSA et en insistant davantage sur leurs forces cognitives que sur leurs déficits. Effectivement, il est fréquemment relevé des capacités « extraordinaires » chez certaines personnes présentant un TSA en comparaison à la population générale comme un fonctionnement perceptif surinvesti (Mottron et al., 2006), une pensée conceptuelle et des capacités développées dans la résolution de problèmes (Dawson et al., 2007) et une expertise dans certains domaines spécifiques (art, musique par exemple).

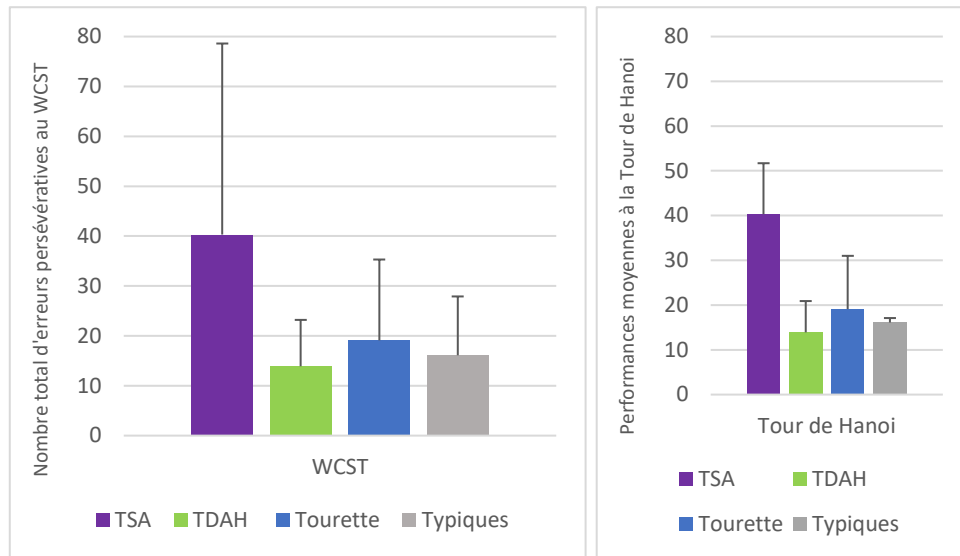


Figure 12. Comparaison des performances dans des tâches exécutives chez des sujets TSA, TDAH et syndrome de la Tourette versus des sujets typiques. Traduit et adapté d'après les travaux menés par Ozonoff et Jensen (1999).

A – Performances des enfants à la tâche WCST ; des scores élevés indiquent de basses performances.

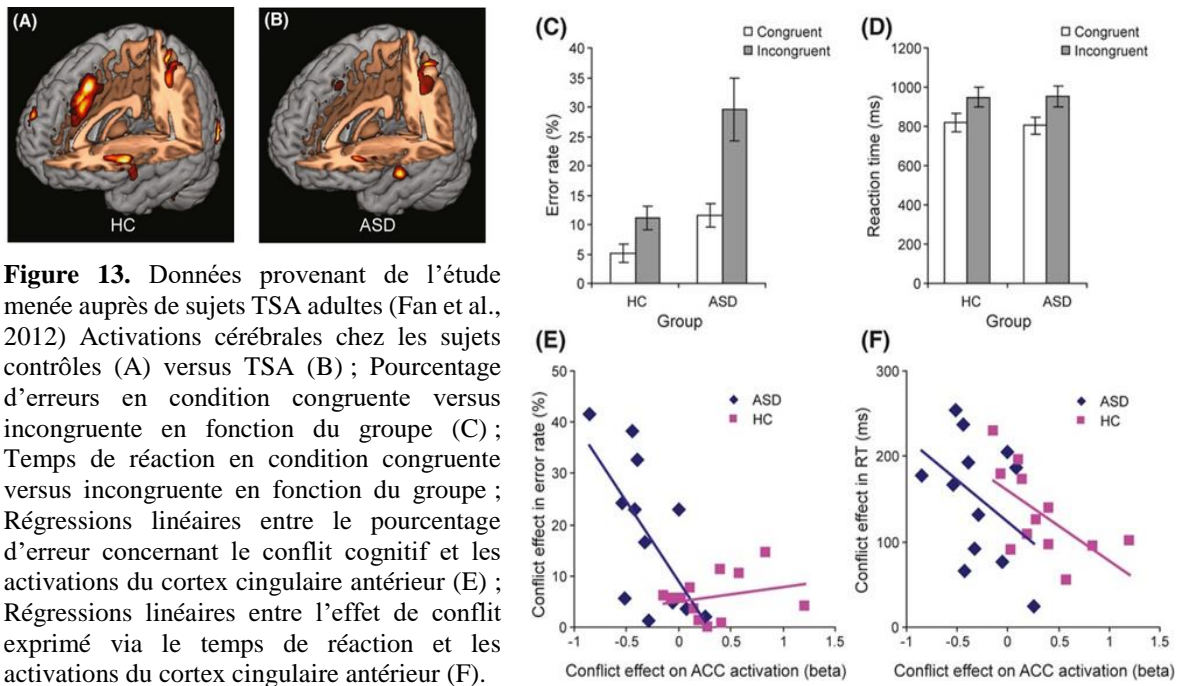
B – Performances des enfants à la tour de Hanoi ; des scores élevés indiquent de basses performances.

L'ensemble des manifestations cliniques relevées dans le TSA peuvent trouver leurs origines dans un fonctionnement neurocognitif atypique. Des études menées en IRM relèvent un défaut de connectivité fonctionnelle entre les régions frontales et postérieures du cortex cérébral au cours de différentes tâches cognitives impliquant le traitement des informations sociales, les processus visuo-spatiaux, mais également de manière plus générale certaines fonctions exécutives et la mémoire de travail (Just et al., 2004, 2007, 2012). Des hypothèses récentes émergent dans la littérature pour tenter de mettre en lien les manifestations comportementales rapportées en lien avec l'activité cérébrale chez les patients présentant un TSA (Sabag et Geva, 2022). Une interdépendance altérée entre les réseaux attentionnels et une faible spécificité dans l'activation de ces réseaux en raison d'un élagage synaptique insuffisant durant l'enfance sont rapportées chez les patients présentant un TSA. Plus spécifiquement, des hyperactivations des réseaux postérieurs de l'attention engendreraient une faible discrimination dans le traitement prioritaire de certains stimuli, et des déficits dans le traitement des informations sociales (Farrant et Uddin, 2016). Chez les enfants d'âge préscolaire présentant un TSA, des altérations de connectivité fonctionnelle sont également mises en évidence dans l'hippocampe, l'amygdale, le gyrus parahippocampique, le gyrus supérieur frontal et le gyrus temporal inférieur, conjointement à des suractivations au sein du réseau de mode par défaut (Qin et al., 2022).

En utilisant une version modifiée de l'ANT, Fan et collaborateurs (2012) ont tenté de mettre en évidence les dysfonctionnements des réseaux de l'attention chez des adultes présentant un TSA. Concernant l'attention d'alerte, ils commettent davantage d'erreurs que les adultes du groupe contrôle lorsqu'il n'y a pas d'indice précédant la cible, conjointement à des activations atypiques du gyrus préfrontal médian. Concernant l'attention d'orientation, aucune différence significative n'est notable entre les deux groupes d'un point de vue comportemental. En revanche, les adultes présentant un TSA présentent une activation accrue de certaines régions du réseau du mode par défaut ainsi que du cortex cingulaire antérieur, de la jonction temporo-pariétale et du gyrus fusiforme, qui pourraient indiquer un effort plus important pour traiter l'information et aboutir à un comportement. D'autres travaux suggèrent également des dysfonctionnements au niveau du cervelet, impliqué dans le traitement des informations cognitives, sensorielles et motrices, pour expliquer les difficultés relevant de l'attention d'orientation (Courchesne et al., 1994; Courchesne et Allen, 1997). Cela pourrait être dû à la nature des stimuli présentés dans les paradigmes tels que l'ANT, à savoir des indices non-sociaux.

Concernant l'attention exécutive, l'analyse des données comportementales a permis de mettre en évidence que les adultes présentant un TSA commettent davantage d'erreurs en condition incongruente que les adultes du groupe contrôle (Figure 13C). L'effet du conflit au travers du taux d'erreur est corrélé aux activations du cortex cingulaire antérieur chez les adultes présentant un TSA seulement (Figure 13E). Ainsi, une augmentation du coût du conflit par le taux d'erreur est liée à une diminution de l'activité dans le cortex cingulaire antérieur chez les adultes présentant un TSA. En revanche, concernant le coût de conflit mesuré par la différence des temps de réaction, les activations du cortex cingulaire antérieur sont identiques (Figure 13F). De plus, le manque d'efficacité à traiter le conflit cognitif chez les adultes présentant un TSA est directement associé à des manifestations comportementales atypiques dans le domaine du langage et de la communication, évaluées par des échelles spécifiques. L'un des principaux biais dans ces études en neuroimagerie reste néanmoins que les profils de patients présentant un TSA sont souvent des profils à haut niveau de fonctionnement, ne permettant pas de témoigner d'autres profils avec davantage de difficultés développementales. Ces profils seraient pertinents à étudier d'un point de vue fonctionnel, mais l'environnement sensoriel associé au matériel expérimental des mesures en imagerie peut compromettre les mesures chez ces profils de patients. Les capacités cognitives et langagières étant également davantage altérées chez les

profils présentant un TSA plus sévère, il est difficile de s'appuyer sur des paradigmes comme l'ANT.



Renner et collaborateurs (2006) ont étudié spécifiquement l'attention d'orientation auprès d'enfants et adolescents âgés de 7 à 17 ans en faisant varier la localisation des indices visuels (indices au centre de l'écran, ou indices en périphérie de l'écran). Les auteurs ont mis en évidence une préservation des capacités d'orientation lorsque l'indice est au centre de l'écran et des capacités altérées lorsque l'indice est présenté en périphérie. Ces résultats suggèrent que les déficits d'orientation ne sont pas spécifiques au traitement des stimuli sociaux. L'étude menée par Keehn et collaborateurs (2010) auprès d'enfants et adolescents présentant un TSA âgés de 8 à 19 ans qui devaient résoudre une ANT semblable au design présenté chez les adultes (Fan et al., 2002), rapportent également des difficultés concernant l'attention d'orientation, en particulier la difficulté à traiter les situations avec indice spatial. Les auteurs remarquent également des interactions entre l'attention d'alerte et l'attention exécutive chez les personnes présentant un TSA : les moins performants à gérer l'interférence en condition incongruente sont également ceux qui ont une attention d'alerte peu efficiente.

L'étude menée par Mutreja et collaborateurs (2016) auprès d'enfants présentant un TSA âgés de 5 à 11 ans sur la version originale de la *Child-ANT* (Rueda, Fan, et al., 2004a) a également mis en évidence, dans le cadre des capacités d'attention d'orientation, des difficultés à bénéficier de l'apport d'un indice spatial avant l'apparition des stimuli. Toutefois, lorsque l'indice est présenté au centre de l'écran, les enfants présentant un TSA sont plus rapides que

leurs pairs au développement typique. Cette différence, précédemment rapportée dans l'étude de Renner et collaborateurs (2006) auprès d'enfants et adolescents, est montrée ici chez des enfants plus jeunes, dès l'âge de 5 ans, suggérant que très tôt, les différences de traitement sensoriel des indices visuels pourraient être un marqueur précoce des difficultés d'attention d'orientation et de traitement atypique des stimuli sociaux. Concernant l'attention exécutive, les temps de réaction entre les conditions congruentes et incongruentes étaient similaires pour les deux groupes, mais le taux de bonnes réponses était significativement plus faible chez les enfants présentant un TSA. Ce résultat suggère une difficulté à ignorer l'information distractive, ce qui entraîne davantage d'erreurs dans la localisation du stimulus incongruent. Les capacités d'attention d'alerte étaient préservées, tout comme dans une précédente étude (Keehn et al., 2010).

Les études conduites sur l'efficacité des réseaux attentionnels chez les enfants et adolescents présentant un TSA fournissent des résultats controversés en fonction du paradigme employé, de l'âge des participants, mais également de leur profil cognitif. En résumé, une mobilisation différente des réseaux attentionnels est mise en évidence chez les patients présentant un TSA, ce qui pourrait expliquer les manifestations comportementales rapportées dans la symptomatologie du trouble.

2.3. Attention exécutive et troubles des apprentissages

2.3.1. Caractéristiques et prévalence des TDA

Les TDA¹⁵ se caractérisent par des altérations dans différents domaines fondamentaux tels que la lecture (dyslexie), l'écriture (dysorthographe), ou encore le calcul (dyscalculie). Dans le DSM-5, ces troubles se regroupent au sein des troubles spécifiques du langage et des apprentissages (TSLA). Ces altérations sont spécifiques et établies à l'aide d'évaluations cliniques standardisées qui indiquent des performances déficitaires par rapport à la norme attendue à un âge donné. Les troubles sont qualifiés s'ils sont durables et persistants depuis plus de 6 mois et interfèrent de façon significative avec l'environnement de l'enfant, notamment dans l'environnement scolaire. Ils ne peuvent pas s'expliquer par la présence d'une déficience intellectuelle, de déficiences sensorielles (auditives ou visuelles) ou d'un trouble neurologique ou mental.

¹⁵ L'emploi de la terminologie « dys » est encore fréquemment employée en France, nous utiliserons la terminologie désormais trouble des apprentissages.

À l'échelle mondiale, on estime la prévalence des TDA entre 5 et 15%. Ils présentent une grande variabilité liée à des facteurs culturels (comme la langue maternelle) et/ou au milieu socio-économique. En Allemagne, environ 17% des enfants scolarisés présentent des déficits en lecture et en écriture (Döhla et Heim, 2016). En France, peu d'études permettent d'avoir une estimation fiable de la prévalence de ces troubles. Les travaux menés par Fluss et collaborateurs (2008) auprès d'un échantillon de 1020 enfants de CE1 ont mis en évidence qu'un trouble sévère d'apprentissage de la lecture touchait 12,7% des enfants examinés. Ce taux était d'autant plus élevé dans des écoles accueillant des élèves issus de milieux socio-économiques défavorisés.

Les TDA ne sont souvent pas présents de manière isolée et une forte comorbidité est présente entre eux mais également avec d'autres TND comme le TDA/H (Cantwell et Baker, 1991), dont la symptomatologie altère très fortement le fonctionnement attentionnel et exécutif (Al Dahhan et al., 2022) (Figure 14). Ils peuvent également être associés à des difficultés du langage oral (dysphasie), de coordination motrice (dyspraxie) ou d'écriture (dysgraphie). Selon les données provenant d'un rapport de l'INSERM (2007), près de 40% des enfants porteurs d'un TDA présentent en réalité plusieurs troubles.

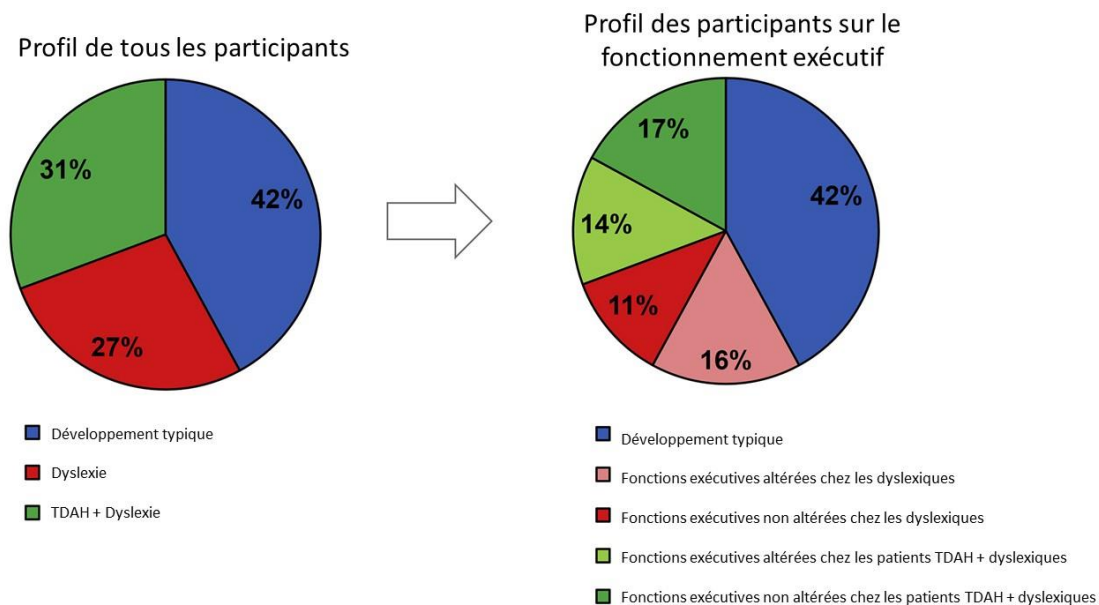


Figure 14. Hétérogénéité des groupes sur les mesures des fonctions exécutives. Les performances sont considérées comme altérées lorsqu'elles sont inférieures à 1,5 écart type de la moyenne basé sur les performances d'un groupe témoin apparié en âge. Traduction d'après l'article de Al Dahhan et al. (2022)..

2.3.2. Troubles de l'attention dans les TDA

Tous les apprentissages fondamentaux, que ce soit la lecture, l'écriture ou le calcul, nécessitent la mise en œuvre de processus attentionnels et exécutifs. Les études menées chez

des enfants et adultes présentant un TDA ont mis en avant des dysfonctionnements attentionnels et exécutifs sur les plans cognitif et neurocognitif. L'étude menée par Varvara et collaborateurs (2014) auprès d'enfants âgés de 8 et 17 ans a mis en évidence des performances réduites des enfants présentant un déficit en lecture dans des tâches de fluences phonologiques et catégorielles, dans des tâches de mémoire de travail verbale et dans des tâches de mémoire à court terme verbale et visuelle ainsi que dans des tâches d'attention visuo-spatiale et auditive (en comparaison à un groupe d'enfants au développement typique). Des altérations de la mémoire de travail sont fréquemment rapportées dans les études conduites auprès de patients présentant un TDA avec déficit en lecture avec un dysfonctionnement des sous-systèmes de stockage (boucle phonologique et calepin visuo-spatial) et du centre de contrôle exécutif, si l'on se réfère au modèle de Baddeley (1986) (Menghini et al., 2010; Smith-Spark et Fisk, 2007). La méta-analyse effectuée par Booth et collaborateurs (2010), recensant 48 études menées dans le champ des TDA avec déficit en lecture souligne une grande hétérogénéité concernant les dysfonctionnements exécutifs en fonction du type de tâche employée et des profils cognitifs des patients.

De nombreuses études existent concernant les troubles attentionnels et exécutifs chez les patients présentant un TDA avec déficit en lecture (pour une méta-analyse, voir Lonergan et al., 2019). Elles sont plus rares dans les autres TDA. On note des altérations de l'attention visuelle chez les patients présentant un TDA avec des troubles de l'écriture (Döhla et al., 2018), des altérations de la mémoire de travail chez des patients présentant un TDA avec troubles spécifiques du calcul et un dysfonctionnement exécutif global chez des patients présentant des difficultés de coordination motrice (Leonard et al., 2015). L'étude d'Askenazi et Henik (2010) menée auprès d'une population d'étudiants présentant un TDA avec déficit en calcul sans trouble associé a mis en évidence, au travers de la tâche ANT-I, un déficit des réseaux d'attention d'alerte et d'attention exécutive.

Une étude longitudinale, de la période préscolaire jusqu'à l'entrée en école primaire, menée auprès d'enfants à haut risque de trouble spécifique de l'apprentissage de la lecture, a permis d'identifier des facteurs de risques (Thompson et al., 2015). De faibles performances dans des tâches exécutives, un langage pauvre et une faible conscience phonologique semblent être des éléments prédictifs de l'apparition de difficultés assimilées au diagnostic. De manière générale, de bonnes capacités d'attention exécutive dès la période préscolaire prédisent la réussite académique ultérieure en mathématiques ou en lecture, réduisant ainsi le risque de développer un TDA (Clark et al., 2010; Cueli et al., 2020; Demetriou et al., 2020; Geary, 2011).

Des travaux récents en neuroimagerie fonctionnelle (IRMf), suggèrent que les enfants avec un TDA avec déficit en lecture ont une synchronisation altérée des réseaux de l'attention exécutive, de l'attention visuelle ainsi que des réseaux impliqués dans la lecture qui pourrait être à l'origine des difficultés rencontrées sur le plan comportemental dans des tâches évaluant attention, fonctions exécutives et activité de lecture (Taran et al., 2022). En effet, une meilleure connectivité fonctionnelle des réseaux associés à l'attention exécutive, notamment le réseau cingulo-operculaire et le réseau ventral de l'attention est observée chez les enfants les plus performants dans une tâche de fluence de lecture (Freedman et al., 2020).

Concernant les patients présentant un TDA avec déficit en calcul, des différences structurelles ont été mises en évidence dans des régions associées à l'attention exécutive, avec notamment une réduction du volume de matière grise du cortex cingulaire antérieur et des gyri frontaux (Rotzer et al., 2008). Chez des enfants âgés de 8 à 12 ans, Farah et collaborateurs (2022) ont mis en évidence des altérations dans les volumes de substance blanche liées à la mémoire de travail, à l'inhibition et aux déficits des fonctions exécutives chez les enfants avec un déficit en lecture.

En résumé, les troubles attentionnels en lien avec des altérations sur le plan structurel et fonctionnel des réseaux attentionnels semblent avoir une incidence majeure sur la trajectoire développementale de l'enfant dans l'émergence de TDA.

3. Facteurs de risque de trajectoires développementales atypiques

Il semble difficile de répertorier la multiplicité de facteurs de risques associés à une trajectoire développementale atypique étant donné leur variété d'expression à de multiples échelles, allant de l'héritage génétique de l'individu aux environnements pré et périnataux dans lesquels l'enfant évolue. Certaines prédispositions provenant du patrimoine génétique de l'individu sont connues pour être associées à certains TND (Hanly et al., 2021; Parenti et al., 2020). L'identification des causes génétiques des TND permet parfois de comprendre l'origine du trouble et son évolution future, bien qu'il subsiste pour de mêmes gènes candidats une grande variabilité phénotypique, c'est-à-dire une diversité de manifestations cliniques et de symptômes observés chez les individus porteurs de mutations similaires. On retrouve des corrélations très fortes entre les variants génétiques associés au TSA et au TDA/H dans les études familiales, pouvant expliquer à la fois une forte comorbidité et une part de symptomatologie commune (Ghirardi et al., 2018). Certains TND sont connus pour avoir une origine spécifiquement

génétique, c'est le cas du syndrome de l'X fragile, le syndrome de Rett ou bien le syndrome de Down, plus communément appelée trisomie 21.

Si les origines génétiques de certains troubles sont désormais davantage documentées dans la littérature, d'autres facteurs environnementaux sont associés à l'expression d'une trajectoire développementale atypique au cours la période préscolaire et contribuent à l'émergence d'un syndrome dysexécutif. Par exemple, les enfants avec un syndrome d'alcoolisation fœtale (SAF), forme la plus sévère de trouble lié à la consommation d'alcool pendant la grossesse, présentent avec un déficit généralisé sur le plan de l'attention et des fonctions exécutives (Kodituwakku, 2009; Lange et al., 2019). Au regard de la multiplicité des facteurs de risques pouvant interagir avec le développement de l'individu, il semble difficile de pouvoir déterminer l'origine d'un trouble par un seul de ces facteurs. Parmi les facteurs de risques ayant des origines multifactorielles, les naissances prématurées, dont l'origine reste encore parfois inexplicée, représentent un véritable défi dès la venue au monde concernant le neurodéveloppement de ces enfants nés trop tôt.

3.1. La prématurité : un facteur de risque à part entière

Une naissance est dite prématurée si l'enfant naît avant 37 semaines d'aménorrhée (SA), c'est-à-dire 37 semaines à partir du premier jour des dernières règles de la mère. Au-delà de ce seuil, on considère que la naissance est à terme. Des terminologies spécifiques sont associées à la prématurité : âge gestationnel, âge chronologique, et âge corrigé. L'âge gestationnel correspond au temps écoulé entre la date des dernières menstruations de la mère et la naissance du bébé. L'âge chronologique correspond à l'âge réel, c'est-à-dire l'âge de l'enfant à partir de sa date de naissance. Enfin, l'âge corrigé est celui qu'aurait l'enfant s'il était né à terme, en soustrayant de son âge réel le temps écoulé entre sa naissance et la date du terme afin d'obtenir des repères développementaux communs. Par exemple, si un bébé est né à 30 semaines de grossesse, il est né 10 semaines trop tôt par rapport au terme, il a donc un âge chronologique de 12 mois et un âge corrigé de 9 mois. On distingue différents degrés de prématurité, allant d'une prématurité extrême, dans laquelle la viabilité du fœtus est encore discutée et suscite des débats éthiques, à une prématurité tardive, plus proche du terme (Tableau 1). Toute naissance survenant avant 22 SA ou impliquant un poids de naissance inférieur à 500 grammes est considérée comme avortée.

Tableau 1. Distinction des différents degrés de prématurité.

| | |
|----------------------------|--------------------|
| Prématurité extrême | < 28 SA |
| Grande prématurité | De 28 à > 32 SA |
| Prématurité modérée | De 32 SA à < 34 SA |
| Prématurité tardive | De 34 à > 37 SA |

Le nombre de naissances prématurées ne cesse de croître en raison des progrès de la réanimation néonatale, de la procréation médicalement assistée, de l'augmentation de l'âge des mères et plus récemment, des épisodes de chaleur extrême liés au changement climatique (Bátiz et al., 2022). En 2020, l'OMS estimait à 13,4 millions les naissances prématurées dans le monde. La prévalence mondiale variait, selon des chiffres de 2014, entre 5% et 18% en fonction des pays (Figure 15). Les pays les plus peuplés et avec une situation économique plus instable étaient davantage touchés (Asie du Sud, Amérique du Sud et Afrique, entre autres). Les données françaises nous rapportent une augmentation des naissances prématurées entre 2010 et 2016, passant de 6,5% en 2010 à 7,5% en 2016. Les données de 2021 de l'Enquête Nationale Périnatale indiquent un taux stable à 7%. On relève des disparités selon les régions françaises et des taux de naissances prématurées plus élevés dans certaines régions d'Outre-Mer comme la Guyane ou la Martinique (respectivement 13,5% et 10%). En Normandie, sur la période 2015-2017, le taux de naissances prématurées était de 7,1%, soit un peu plus de 2 500 nouveau-nés par an (Rapport ORS-CREAI, décembre 2018). Un rapport de la Direction de la Recherche, des Etudes, de l'évaluation et des Statistiques (DRESS), publié en février 2022, relève une baisse des naissances prématurées en 2020 lors de la période de pandémie Covid-19, en particulier la prématurité tardive, et dans les départements où le virus a faiblement circulé.

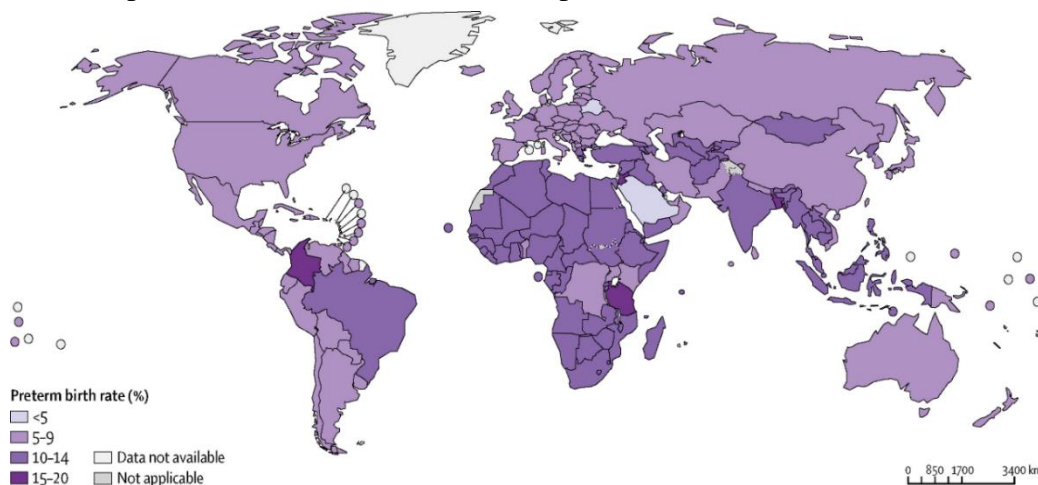


Figure 15. Pourcentage estimé de naissances prématurées dans le monde en 2014 d'après les données de l'OMS (Chawanpaiboon *et al.*, 2018).

Il semble délicat de déterminer un seul facteur de risque associé à une naissance prématurée. On considère qu'il est plus juste de prendre en compte un ensemble de facteurs génétiques, biologiques, neurologiques et environnementaux (Goldenberg et al., 2008; Torchin et Ancel, 2016).

3.2. Prématurité et troubles neurodéveloppementaux

Les recherches menées dans le champ de la prématurité ont mis en évidence des altérations dans différentes sphères du développement sur les plans cognitif, moteur, sensoriel mais également émotionnel (Johnson et Marlow, 2011, voir Figure 16; Marret et al., 2015). Le risque est corrélé avec l'âge gestationnel et le poids à la naissance, les plus grands enfants nés prématurés présentant les plus petits poids de naissance étant davantage exposés à un neurodéveloppement atypique (Arpino et al., 2010). Ce n'est pas pour autant qu'il faut sous-estimer le risque pour les nouveau-nés prématurés plus tardifs, qui sont également exposés à un risque accru de TND par rapport aux enfants nés à terme (Baron et al., 2011; Srinivas Jois, 2018; Woythaler, 2019).

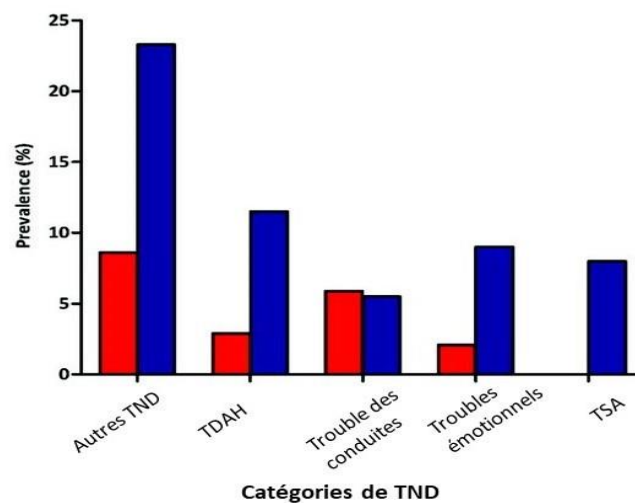


Figure 16. Prévalence de TND à l'âge de 11 ans au sein d'une cohorte de nouveau-nés prématurés (EPICure) traduit en français de l'article de Johnson et Marlow (2011).

Bien qu'il y ait des disparités en termes de prévalence, tous les pays du monde sont concernés par la prématurité et le suivi de ces enfants nés trop tôt (Walani, 2020). Les suivis de cohortes permettent de fournir des indicateurs développementaux sur le devenir de ces nouveau-nés. C'est le cas de la cohorte EPICure en Angleterre et en Irlande, dont les premiers travaux ont débuté en 1995 (Costeloe et al., 2000). Parmi les enfants de cette cohorte présentant des

troubles sévères (troubles qui ont des répercussions notables sur l'autonomie de l'enfant dans différents contextes) au cours de la période préscolaire à 30 mois d'âge corrigé, 86% d'entre eux présentent toujours à l'âge de 6 ans des déficits modérés à sévères dans différents domaines (Marlow et al., 2005). Comparés à leurs camarades de classe nés à terme, ils sont moins performants dans des grands domaines neuropsychologiques évalués dans la batterie NEPSY-II (Korkman et al., 2012) : le développement sensorimoteur, le traitement visuo-spatial et l'attention exécutive (Marlow et al., 2007).

Des progrès considérables dans le champ de la réanimation néonatale ont été effectués entre les premiers suivis de cohorte à l'aube des années 2000 et les études les plus récentes, augmentant l'effectif des nouveau-nés extrêmes prématurés dans les cohortes (Costeloe et al., 2012). Les données de ces premières études menées au début des années 2000 permettent désormais d'avoir des informations sur le devenir de ces enfants à l'adolescence ainsi qu'à l'âge adulte (Linsell et al., 2019; Ni et al., 2021; Wolke et al., 2019). Les altérations cognitives et comportementales rapportées chez les enfants inclus dans la cohorte EPICure en période scolaire, se retrouvent ultérieurement à l'âge adulte dans des contextes différents, notamment dans le domaine du travail ou dans des tâches quotidiennes avec des difficultés à maintenir son attention, des relations sociales restreintes et des difficultés de régulation émotionnelle (Linsell et al., 2019).

En France, des enquêtes nationales périnatales permettent également de suivre le devenir des enfants nés prématurés. Les données de la première étude EPIPAGE lancée en 1997 mettent en évidence, en comparaison avec une population de nouveau-nés nés à terme, une différence significative des processus mentaux composites (une mesure des performances cognitives globales qui correspond à la note totale à l'échelle K-ABC 2, (Kaufman et Kaufman, 2014)) et une prévalence accrue de troubles émotionnels et de troubles du comportement à l'âge de 5 ans (Larroque et al., 2008). Les données de l'étude EPIPAGE-2 lancée en 2011 mettent en évidence une prévalence accrue de TND chez les enfants avec les plus petits âges gestationnels et provenant d'un milieu socio-économique plus défavorisé à l'âge de 5 ans (Pierrat et al., 2021, voir Figure 17). L'analyse des données à 5 ans et demi a par ailleurs permis d'identifier quatre profils différents d'enfants en fonction des déficits exprimés, de leur sévérité et de leurs comorbidités (Twilhaar et al., 2021). 45% des enfants ne présentent aucune difficulté développementale majeure, 31% des enfants présentent un fonctionnement cognitif et une motricité de niveau faible à moyen en l'absence de difficultés comportementales et psychosociales, 16% présentent des symptômes comportementaux et psychosociaux légers

avec un fonctionnement cognitif et moteur dans une moyenne faible, et 8 % présentent des déficits moteurs et cognitifs modérés, associés à des symptômes légers d'hyperactivité/inattention et/ou des symptômes associés au TSA.

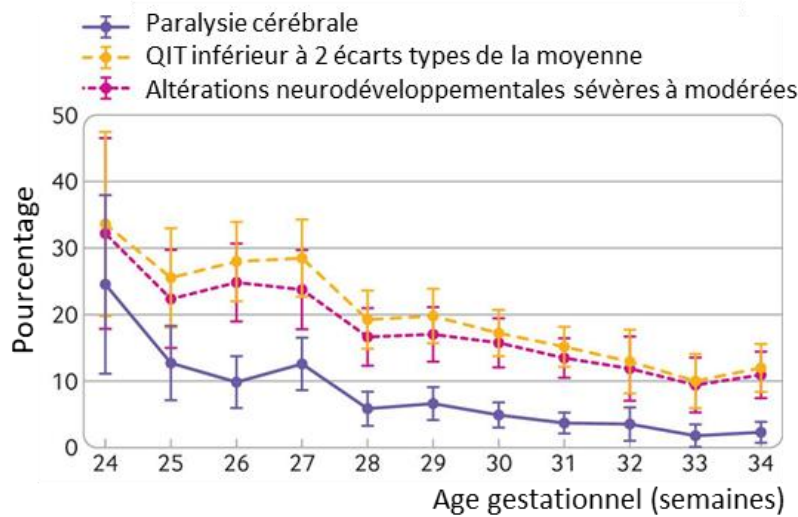


Figure 17. Suivi neurodéveloppemental à 5 ans des nouveau-nés prématurés provenant de la cohorte EPIPAGE-2, traduit d'après l'article de Pierrat et al. (2021).

Des altérations structurelles cérébrales sont également présentes avec une réduction des volumes de matière grise et blanche (Chau et al., 2013). Une méta-analyse effectuée par Mukerji et collaborateurs (2015) auprès de 15 études menées sur des nouveau-nés prématurés ayant une hémorragie intra-ventriculaire (HIV)¹⁶ modérée ou sévère, a mis en évidence une incidence plus élevée de TND contrairement aux nouveau-nés sans HIV. Contrairement à de précédents travaux, les résultats de cette méta-analyse suggèrent également que les HIV de grades 1 et 2 peuvent également avoir des séquelles sur le développement cognitif ultérieur et la réussite scolaire.

3.3. Prématurité et syndrome dysexécutif

Le syndrome dysexécutif désigne un ensemble d'altérations concernant les processus exécutifs et les altérations des réseaux cérébraux associés, que l'on observe fréquemment chez les enfants nés prématurés même sans diagnostic de TND (Gire et al., 2022). Il n'existe pas un syndrome dysexécutif spécifique mais plutôt des syndromes dysexécutifs s'exprimant de manière hétérogène chez les individus (Roy et al., 2017). Des dysfonctionnements exécutifs

¹⁶ Les hémorragies intraventriculaires sont distinguées en 4 grades différents, celles de grade 3 et 4 étant les plus sévères.

sont fréquemment rapportés auprès d'enfants nés prématurés, que ce soit en période préscolaire ou scolaire (Aarnoudse-Moens et al., 2012; Böhm et al., 2004; Borradori Tolsa et al., 2014; Mulder et al., 2009). Si les altérations cognitives sont davantage importantes chez les profils d'enfants nés grands prématurés, ce n'est pas pour autant que les profils d'enfants nés avec une prématurité modérée ne sont pas concernés par des dysfonctionnements exécutifs (Taylor et Clark, 2016).

Chez des enfants d'âge scolaire (âgés de 7 à 9 ans), les enfants nés grands prématurés (<27 SA) présentent des performances plus faibles que leurs pairs nés à terme dans des tâches mobilisant l'attention exécutive et les fonctions exécutives (Shum et al., 2008). Dans cette étude, les enfants nés grands prématurés ont un score significativement plus faible au subtest d'attention visuelle de la batterie NEPSY-II (Korkman et al., 2012), un temps de complétion plus élevé dans la tâche *Trail-Making-Test* partie B (relier chiffres et lettres de façon simultanée) et des performances plus faibles au sein de subtests du WISC-3 (Wechsler, 1991) évaluant la mémoire de travail visuelle et spatiale. De telles observations sont également rapportées dans l'étude de Heeren et collaborateurs (2017) qui ont identifié des profils neurocognitifs spécifiques à l'âge de 10 ans auprès d'une cohorte de 873 enfants nés grands prématurés (<28 SA). La batterie proposée comprenait une évaluation des capacités de raisonnement verbal et non verbal, une évaluation des fonctions exécutives et une évaluation des compétences académiques (lecture et mathématiques). 34% des enfants avaient un profil neurocognitif « normal », caractérisé par des scores moyens dans l'ensemble des mesures proposées. 41% des enfants présentaient un profil neurocognitif « faiblement normal », caractérisé par des variations autour de 0,5 écart-type en dessous de la norme. 17% présentaient un profil neurocognitif « modérément altéré », caractérisé par des scores moyens entre 1,5 et 2,5 écart-types en dessous de la norme. Enfin, 8% des enfants présentaient un profil neurocognitif « gravement altéré », caractérisé par des scores moyens d'environ 3 à 4 écart-types en dessous de la norme. Les enfants nés extrême prématurés (entre 23 et 24 SA) exprimaient davantage des profils cognitifs « gravement altérés ».

Chez les enfants d'âge préscolaire (âgés de 4 à 5 ans), Loe et collaborateurs (2019) ont proposé une batterie neuropsychologique adaptée à l'âge des enfants (deux tâches d'inhibition, une tâche de fluence verbale, une tâche de mémoire de travail et la tâche DCCS (Zelazo, 2006) évaluant la flexibilité par le changement de règles dans un tri de cartes). Les parents étaient également invités à compléter des questionnaires : la BRIEF-P (Gioia et al., 2003), une évaluation des fonctions exécutives en situation de vie quotidienne et la CBCL (Achenbach et

al., 2001), une évaluation des comportements qui met en évidence des manifestations cliniques problématiques (comportements internalisés et externalisés). Concernant les mesures de performance des fonctions exécutives et de la mémoire de travail, les enfants nés prématurés présentaient des performances significativement plus faibles dans l'ensemble des tâches proposées que leurs pairs nés à terme. Le score composite exécutif global rapporté à la BRIEF-P était également plus élevé chez les profils d'enfants nés prématurés, indiquant un plus grand dysfonctionnement exécutif que leurs pairs nés à terme. Des problèmes de comportement étaient également davantage rapportés dans l'échelle CBCL. Les auteurs ont également relevé une plus grande variabilité des performances et des réponses aux deux hétéro-questionnaires dans l'échantillon d'enfants nés prématurés. Davantage d'enfants se situent dans des seuils qualifiés de pathologiques que ce soit pour la BRIEF-P ou la CBCL. López Hernández et collaborateurs (2022) ont également étudié l'impact d'une naissance prématurée sur le développement des fonctions exécutives et de la motricité à l'âge de 3 ans en croisant les réponses fournies par les parents à la BRIEF-P (Gioia et al., 2003), les observations comportementales de l'expérimentateur et les performances à la batterie de développement de Bayley-III (Bayley, 2015). Les auteurs ont mis en évidence que les enfants nés avec un plus petit âge gestationnel et un plus petit poids diffèrent significativement sur le score composite exécutif global, l'indice de flexibilité et de contrôle émotionnel de la BRIEF-P. Ils ont également mis en évidence une corrélation entre le niveau de développement global de l'enfant et les capacités de mémoire de travail, de planification et l'indice de métacognition émergente rapportés dans la BRIEF-P.

Concernant l'efficacité des réseaux attentionnels au regard du modèle de Posner (Posner et Petersen, 1990), peu de travaux se sont intéressés aux enfants nés prématurés. Après analyse de la littérature, nous relevons trois études menées spécifiquement auprès d'enfants d'âge préscolaire et scolaire nés prématurés à qui l'on a proposé un paradigme proche ou semblable à l'ANT (Leclercq et al., 2006; Pizzo et al., 2010; Snyder et al., 2007).

Leclercq et collaborateurs (2006) ont interrogé des enfants nés prématurés âgés de 7 et 11 ans, présentant des profils neuropsychologiques hétérogènes (TDA, troubles attentionnels diagnostiqués, anomalies cérébrales révélées par IRM). Ils ont montré qu'ils étaient deux fois plus lents pour fournir une réponse en condition incongruente et commettaient davantage d'erreurs sur une tâche comme l'ANT. Toutefois, cette étude a été réalisée sur un petit échantillon de participants (N=7), et ne permet pas d'attester d'une validité statistique significative. Par contre, cette étude fournit des éléments cliniques pertinents pour appréhender

l'efficacité des réseaux attentionnels chez ces populations. Les troubles de l'attention exécutive relevés dans cette étude sont proposés comme pouvant être à l'origine des difficultés rapportées dans un environnement scolaire (acquérir des connaissances, ajuster son comportement, résoudre des problèmes par exemple). Par ailleurs, les temps de réaction en condition incongruente obtenus à l'ANT dans ce groupe d'enfants nés prématurés semblent être les plus sensibles pour mettre en évidence des altérations de l'attention exécutive, contrairement aux batteries neuropsychologiques.

L'étude de Snyder et collaborateurs (2007) conduite auprès d'enfants d'âge préscolaire présente l'effectif d'enfants le plus conséquent (N=96) et rapporte des temps de réaction significativement plus lents dans l'ensemble des conditions de la tâche ANT (condition neutre, condition congruente et condition incongruente). Pizzo et collaborateurs (2010) ont interrogé 25 enfants nés prématurés (<32 SA) et 25 enfants nés à terme âgés de 5 ans ½ à 6 ans ½ sur la *Child-ANT*. Les auteurs rapportent également des temps de réaction plus lents dans les différentes conditions de l'épreuve (condition neutre, condition congruente et condition incongruente) ainsi qu'un taux d'erreurs plus élevé chez les enfants nés prématurés. Les auteurs mettent également en évidence un déficit spécifique de l'attention exécutive, après avoir effectué les soustractions des temps de réaction des conditions incongruentes aux conditions congruentes. Les enfants nés prématurés ont davantage de difficultés à gérer le conflit cognitif provoqué par les stimuli incongruents dans des tâches comme la *Child-ANT*.

En résumé, l'ensemble des facteurs de risque associés à une naissance prématurée peut avoir des incidences majeures sur le développement cognitif et la construction des réseaux cérébraux attentionnels. Repérer le plus tôt possible la présence de ces facteurs permettrait à l'ensemble des professionnels concernés de porter une vigilance toute particulière au développement précoce de l'enfant avant une éventuelle apparition de symptômes et/ou de proposer une prise en charge ainsi qu'une remédiation adaptées lorsque le trouble est avéré. De plus, on sait qu'une prise en charge précoce permet d'encourager la plasticité cérébrale et d'optimiser une réorganisation de réseaux cérébraux en l'absence de lésions cérébrales majeures (Inguaggiato et al., 2017).

4. Les enjeux du dépistage précoce des troubles neurodéveloppementaux

Considérer le plus tôt possible la multiplicité de facteurs de risque, et repérer des altérations précoces dans le neurodéveloppement de l'enfant, constitue un véritable enjeu de santé publique mondial. En France, les différents gouvernements ont, ces dernières années, mis

l'accent sur le dépistage précoce des TND. Des plateformes de dépistage précoce ont été mises en œuvre, les parcours de soins en institution ont été améliorés, et la coordination pluridisciplinaire entre les différents professionnels qui contribuent à la prise en charge de l'enfant sur les plans éducatifs, thérapeutiques et pédagogiques a été encouragée. Bien que l'on puisse prendre connaissance de signes précoces de troubles durant la première année de vie, peu d'interventions sont proposées dès le plus jeune âge car elles conduisent l'enfant et sa famille vers un accompagnement et un parcours de soins qui peuvent stigmatiser l'enfant dans une catégorie potentielle d'enfants au développement atypique (Rolland et al., 2006). Pourtant, elles permettraient parfois de limiter une aggravation des symptômes et d'encourager la mise en œuvre de stratégies compensatoires (de Courson-Fournerie et al., 2021; Farmer et al., 2021).

Il s'agit à présent de faire du lien avec la clinique, de mettre en évidence les forces et faiblesses des politiques de dépistage précoce et de souligner la nécessité de poursuivre cette démarche en identifiant de nouveaux marqueurs de dépistage précoce des TND.

4.1. Le dépistage précoce des TND en France : état des lieux

Si les efforts se déploient de plus en plus dans les politiques publiques de dépistage précoce des TND en France, il n'en demeure pas moins qu'elles sont encore confrontées à certaines limites pour leur pleine mise en œuvre sur le terrain. Cette démarche doit se poursuivre en lien avec les recherches visant à identifier de nouveaux marqueurs de dépistage précoce des TND pour trouver son ancrage dans la clinique des TND.

Des recommandations de bonnes pratiques cliniques concernant le repérage et le dépistage des TND ont été publiées par l'HAS en 2020. Elles s'inscrivent dans la stratégie nationale de santé 2018-2022, plus spécifiquement dans l'axe : « Améliorer le repérage, et la prise en charge précoces des troubles et maladies de l'enfant ». Elles visent à harmoniser les pratiques de dépistage des TND, en favorisant une prise en compte des populations à risque au sein de réseaux de suivi pédiatriques composés d'équipes pluridisciplinaires (plateformes d'orientation et de coordination). En Normandie, le réseau de périnatalité normand et Normandie Pédiatrie permettent d'accompagner et de suivre des enfants à risque neurodéveloppemental ou des enfants ayant un TND. Au sein de ces équipes, le réseau « Petit Deviendra Grand » permet de suivre les enfants nés prématurés et de leur proposer régulièrement des consultations de suivi pédiatrique à des âges clés du développement.

Conjointement à ces réseaux, Santé Publique France a développé un site web destiné

aux parents sur les 1000 premiers jours de vie de l'enfant¹⁷. Des conseils et informations pratiques sont délivrés autour de trois éléments fondamentaux du développement de l'enfant (sécurité environnementale, alimentation et sécurité affective). L'accent est également mis sur l'impact de certains facteurs de risques (consommation de tabac et d'alcool durant la grossesse par exemple) et leurs répercussions sur le développement de l'enfant. Le site aborde aussi des points clés liés à la parentalité (vie de couple, organisation du quotidien et bouleversements émotionnels par exemple).

Les différents gouvernements français ont mis en œuvre des plans autisme¹⁸ afin d'améliorer la reconnaissance et la prise en charge des TSA. Depuis 2006, chaque région française a développé des Centres Ressource Autisme (CRA) coordonnés par des équipes pluridisciplinaires afin de repérer et d'accompagner le plus tôt possible les enfants à haut risque de TSA. Depuis 2015, une grille de repérage est incluse dans le carnet de santé pour les enfants âgés de 12 à 18 mois (Orève et Speranza, 2015). Une stratégie pour l'autisme au sein des TND est parue en avril 2018 et s'articule autour de quatre grands objectifs. Parmi ces objectifs, on retrouve : inclure socialement des personnes porteuses d'un TSA, proposer des interventions adaptées et respectueuses envers le patient et son entourage, offrir des moyens concrets aux professionnels pour agir et encourager la recherche dans le domaine en assurant la diffusion de connaissances tout en favorisant des méthodes de prises en charge validées par la communauté scientifique.

Alors que l'accent a longtemps été mis sur le TSA, désormais l'ensemble des TND est considéré dans les politiques publiques et les recommandations initialement formulées pour le TSA sont applicables à l'ensemble des TND. Les Centres de Référence pour les Troubles du Langage et des Apprentissages (CRTLA) ont également été déployés sur l'ensemble du territoire français pour répondre à cette demande.

En l'absence de marqueur de développement spécifique aux TND, une identification comportementale des signes précoces *via* un examen des fonctions cognitives fournit au clinicien un aperçu global du fonctionnement de l'enfant (Roy, 2018). La mise en œuvre de mesures d'imagerie cérébrale chez les nouveau-nés à risque tels que les nouveau-nés prématurés permet également d'identifier des anomalies du cerveau en développement (Guillot et al., 2020) et d'assurer une surveillance accrue des éventuels symptômes qui pourraient apparaître ultérieurement. Une étude combinant mesures comportementales et mesures en

¹⁷ Pour plus d'informations : <https://www.1000-premiers-jours.fr/fr>

¹⁸ Le premier plan autisme a été mis en œuvre de 2005 à 2007, le second de 2008 à 2010 et le troisième de 2013 à 2017.

imagerie auprès d'enfants nés prématurés, âgés de 3 à 5 ans, met en évidence que les mesures comportementales effectuées en période préscolaire sont associées aux mesures d'IRM effectuées à l'âge équivalent du terme et en âge préscolaire (Kostović Srzentić et al., 2020). Plus spécifiquement, une réduction du volume de substance blanche dans les régions pariétales, temporales et occipitales était liée aux performances aux subtests de la NEPSY-II (Korkman et al., 2012), batterie d'évaluation neuropsychologique destinée aux enfants à partir de la période préscolaire évaluant des grands domaines de fonctionnement parmi lesquels l'attention et les fonctions exécutives.

En résumé, si les manifestations comportementales liées aux troubles de l'attention ne sont pas saillantes dès la période préscolaire, un examen neuropsychologique de l'attention exécutive et des fonctions exécutives permet d'identifier les enfants à risque de trajectoire développementale atypique. Différentes approches permettent de soutenir parents, enfants et professionnels afin d'accompagner l'évolution des troubles dès le plus jeune âge.

4.2. Accompagner les troubles de l'attention dès le plus jeune âge

Une pleine efficacité de l'attention exécutive demeure un des leviers pour encourager la réussite scolaire d'un élève (Best et Miller, 2010; Blair et Diamond, 2008; Bryce et al., 2015; Yeniad et al., 2013). Si des programmes d'entraînement existent pour favoriser l'attention à l'école chez les enfants typiques¹⁹, dans quelle mesure peuvent-ils s'appliquer aux élèves avec des troubles de l'attention ?

Proposer un entraînement de l'attention directement en milieu écologique comme l'école semble permettre une amélioration dans la mobilisation de l'attention auprès d'enfants porteurs de TND inclus en milieu ordinaire (Kenworthy et al., 2014). Le programme *Unstuck and On Target* (UOT) proposé par Kenworthy et collaborateurs (2014) auprès d'enfants présentant un TSA, visait à entraîner les compétences d'attention exécutive au travers d'un programme cognitivo-comportemental au cours d'une année scolaire. Ce programme propose aux enfants répartis en petits groupes, différents scénarios ludiques pour apprendre comment mobiliser de façon optimale ces différentes compétences. Dans le cadre du TSA, ce programme cible des compétences qui sont fréquemment altérées dans ce trouble : une inflexibilité aux changements et des difficultés de planification, entre autres. Les auteurs ont mis en évidence

¹⁹ Nous pouvons citer entre autres en France le programme ATOLE conçu en collaboration avec des enseignants, qui vise à aider les élèves du CP au CM2 à mieux comprendre les mécanismes qui influencent notre attention au quotidien, tout en s'appuyant sur les connaissances récentes sur le cerveau et son fonctionnement (Lachaux, 2015).

des progrès significatifs entre la phase pré-test et post-test concernant les capacités de flexibilité, de planification mais également en ce qui concerne les compétences sociales.

Les interventions thérapeutiques proposées hors classe *via* la remédiation cognitive offrent également des pistes d'intervention complémentaires pertinentes pour encourager la réorganisation neuronale par la plasticité cérébrale des réseaux neuronaux impliqués dans les fonctions attentionnelles déficitaires (Medalia et Lim, 2004). L'utilisation d'applications éducatives et de jeux cognitifs devient de plus en plus répandue pour cibler les interventions en fonction des besoins spécifiques de l'enfant.

Parmi ces interventions, le programme COGMED est un outil informatisé destiné à entraîner les capacités d'attention, en particulier la mémoire de travail à partir de l'âge de 4 ans (Olesen et al., 2004). Au travers d'une interface ludique, le patient va progresser dans la construction d'un village en gagnant des pièces à assembler au fur et à mesure des séquences d'entraînement qui durent de 25 à 50 minutes. Le programme s'adapte à la progression de chaque enfant et les exercices se complexifient durant l'évolution au cours des séquences. Chez les enfants au développement typique, les effets bénéfiques du programme COGMED sont longs à apparaître, autour de 12-13 mois, et semblent être de bons indicateurs de l'entrée au niveau secondaire (collège/lycée), quelques années plus tard (Berger et al., 2020). Ses effets bénéfiques ont aussi été démontrés après d'enfants présentant un TDA/H âgés de 7 à 12 ans après 20 jours d'entraînement et également 3 mois après l'intervention sur la mémoire de travail, l'inhibition mais également les capacités de raisonnement (Klingberg et al., 2005). Les parents des enfants suivis ont également rapporté une réduction des symptômes d'inattention et d'impulsivité. L'étude EPIREMED menée auprès d'enfants nés grands prématurés de la cohorte EPIPAGE-2 est également en train d'étudier les bénéfices à plus long terme de ce programme de remédiation chez des enfants âgés de 5 ans ½ et 6 ans (Gire et al., 2021).

Le programme *Jungle Memory*, axé sur la mémoire de travail, a également été testé auprès d'une cohorte d'enfants âgés de 4 à 6 ans nés prématurés (âge gestationnel moyen = 28,3 semaines) (Lee et al., 2017). Dans cette étude, on les invitait à effectuer le programme chez eux environ 15 minutes par jour, 5 jours par semaine, pendant 5 semaines. L'attention et les fonctions exécutives ont été évaluées avant et après la participation au programme, ainsi que 5 semaines après. Les résultats mettent en évidence des bénéfices liés à l'entraînement dès la fin de la participation au programme, tandis que ces bénéfices sont observés plus tardivement chez les enfants nés à terme du même âge. En revanche, si des bénéfices sont observées sur des

tâches de performance en laboratoire, le transfert des compétences en situation de vie quotidienne n'est pas observé par les réponses parentales via des hétéro-questionnaires.

Les effets de transfert lointain d'un entraînement cognitif au sein des troubles neurodéveloppementaux ont été discutés dans une méta-analyse conduite par Bombonato et collaborateurs (2023). Elle inclut 17 études conduites auprès de populations âgées de 5 à 18 ans présentant un TND (10 études menées auprès de populations présentant un TDA/H, 3 études auprès de populations présentant un TSA, 2 études auprès de populations présentant une déficience intellectuelle, une étude auprès de populations présentant un TDA et une étude auprès de populations présentant des troubles du comportement). La plupart des études incluses propose des interventions basées sur des composantes cognitives spécifiques comme la mémoire de travail, la flexibilité cognitive et le contrôle inhibiteur et des composantes en lien avec le contrôle cognitif comme l'autorégulation. Dans l'ensemble de ces études, une taille d'effet statistiquement significative a été mise en évidence concernant les effets de transfert lointain d'un entraînement cognitif en particulier concernant le fonctionnement du quotidien (comportements adaptatifs, qualité de vie générale, comportements en classe et relations sociales) mais également sur les manifestations cliniques elles-mêmes (en particulier chez les populations présentant un TDA/H majoritairement représentées dans cette méta-analyse).

Ainsi, identifier dès le plus jeune âge les spécificités des troubles de l'attention permet de proposer des programmes de remédiation adaptés. Si les outils permettant d'évaluer les fonctions cognitives et d'y remédier sont de plus en plus nombreux, il n'en demeure pas moins que l'identification précoce de ces troubles demeure un véritable défi à de multiples niveaux. Des travaux s'intéressant aux marqueurs précoces du TSA et du TDA/H tendent de plus en plus à adopter une perspective multidimensionnelle, tenant compte de l'influence des gènes et de l'environnement dans le développement cérébral précoce (Gliga et al., 2014; Johnson et al., 2015).

4.3. L'attention exécutive : un marqueur cross-syndromique des troubles neurodéveloppementaux

Identifier de nouveaux marqueurs de neurodéveloppement permet de fournir des informations sur le développement cognitif précoce, afin de prévenir d'éventuelles trajectoires développementales atypiques (Johnson et al., 2015, 2021). L'hétérogénéité des symptômes chez les patients présentant le même trouble, la comorbidité fréquente des TND chez le même patient, et le chevauchement des symptômes entre les TND suggèrent fortement qu'ils ont des

facteurs étiologiques et des voies physiopathologiques communs (Taurines et al., 2012). Ces aspects, étudiés de manière isolée, font de la détection et du diagnostic précoce des TND un véritable défi, mais représentent une perspective intéressante si une perspective cross-syndromique est adoptée (Karmiloff-Smith et al., 2012). L'objectif de cette approche est de comprendre les mécanismes sous-jacents communs ou partagés entre différents TND, ainsi que l'imbrication des différents facteurs génétiques, neurobiologiques et environnementaux pour conduire à de meilleures stratégies de dépistage et d'intervention. Dans ce cadre, l'attention exécutive, considérée comme une fonction transversale qui soutient les différentes fonctions affectées dans les TND, pourrait représenter un potentiel marqueur de développement cross-syndromique.

Les déficits d'attention exécutive se chevauchent partiellement dans différents TND comme le montre l'étude de Otterman et collaborateurs (2019). Les auteurs ont tenté de comprendre les relations entre déficits exécutifs rapportés dans le TSA et dans le TDA/H chez des enfants âgés de 3 à 7 ans, suivis longitudinalement. Le questionnaire de la BRIEF-P (Gioia et al., 2003) a été proposé aux parents à 4 ans pour qualifier le fonctionnement exécutif au quotidien. À 6 et 7 ans, parents et enseignants ont complété des échelles pour qualifier les traits autistiques et les traits liés au TDA/H. Les enfants présentant des scores atypiques ont été reçus pour un diagnostic clinique. 56 d'entre eux ont été diagnostiqués avec un profil TSA et 194 avec un profil TDA/H. Les résultats de cette étude semblent montrer que les évaluations précoces rapportées par les parents dès l'âge de 4 ans puissent donner des premiers signes d'alerte quant à une trajectoire développementale atypique.

Dans une approche cross-syndromique, Cornish et collaborateurs (2012) ont étudié l'influence des troubles de l'attention sur les apprentissages socio-cognitifs auprès d'enfants âgés de 4 à 9 ans présentant un syndrome de Down, de Williams ou au développement typique. Ces deux troubles partagent de nombreux symptômes apparentés au TDA/H ainsi qu'un dysfonctionnement exécutif, qui peuvent impacter les comportements sociaux et la réussite académique, suggérant des voies communes dans le développement précoce (Scerif et Steele, 2011). Les expérimentateurs proposaient dans un premier temps aux enfants une mesure des symptômes d'inattention et d'hyperactivité conjointement à une mesure des capacités de vocabulaire et de littératie émergente qui étaient également évalués 12 mois plus tard. Les auteurs ont tenté d'établir un lien entre les profils attentionnels et comportementaux, associés avec l'évolution des compétences en vocabulaire et en littératie. Les résultats obtenus ont mis en évidence un impact différentiel des déficits attentionnels lorsqu'ils sont étudiés de manière

longitudinale dans la prédiction des compétences en vocabulaire et en littéracie dans deux TND. Chez les enfants présentant un syndrome de Down, il existe une forte association entre le déficit attentionnel et les compétences en vocabulaire, tout comme chez les enfants au développement typique, chez lesquels de faibles compétences attentionnelles prédisent la réussite académique ultérieure. En revanche, chez les enfants présentant un syndrome de Williams, aucun lien n'est établi entre les déficits attentionnels et la pauvreté du vocabulaire et de la littératie émergente. Il semblerait ainsi que les enfants présentant un syndrome de Down suivent une trajectoire développementale retardée mais semblable à des profils typiques contrairement aux enfants présentant un syndrome de Williams qui suivraient davantage une trajectoire développementale atypique.

Crisci et collaborateurs (2021) ont caractérisé les déficits exécutifs dans le TDA/H et dans les TDA afin de mieux comprendre les spécificités des profils et la part de comorbidité dans ces deux troubles auprès de 97 enfants d'âge scolaire âgés de 8 à 14 ans. Quatre groupes d'enfants ont été constitués : ceux présentant un TDA/H, ceux présentant TDA, ceux présentant une comorbidité TDA/H + TDA, et un groupe témoin d'enfants au développement typique. Des mesures d'inhibition, de flexibilité cognitive et de mise à jour verbale et visuospatiale ont été administrées au travers de subtests de la batterie NEPSY-II (Korkman et al., 2012) et de tâches informatisées. Les résultats mettent en évidence que les populations cliniques ont obtenu de moins bons résultats que leurs pairs au développement typique, mais aucune différence n'est apparue entre les groupes cliniques concernant les mesures d'inhibition et de flexibilité cognitive. La mesure de mise à jour a été la plus sensible pour discriminer les spécificités entre les deux troubles. Les enfants présentant un TDA ont obtenu de moins bons résultats que les autres groupes dans la tâche de mise à jour verbale, tandis que les enfants présentant un TDA/H ou la forme comorbide TDA/H + TDA ont obtenu de moins bons résultats que les enfants présentant un TDA ou au développement typique dans la tâche visuospatiale. Cette étude met donc en évidence un dysfonctionnement exécutif dans tous les groupes cliniques, suggérant la nécessité d'examiner les similitudes, les interactions et les différences entre ces troubles pour mieux les caractériser. Elle souligne aussi que la comorbidité des troubles n'exacerbe pas de façon systématique l'expression des symptômes cliniques, car les auteurs n'ont pas été en mesure de déterminer un dysfonctionnement exécutif spécifique.

On sait également qu'un développement cérébral atypique est souvent rapporté comme une vulnérabilité exprimée conjointement à une multiplicité de facteurs de risques et précède les manifestations cliniques (Jeste, 2015). Dès la naissance, les réseaux neuronaux de l'attention

sont fonctionnels et soutenus par le réseau de la saillance, qui assure une balance dynamique entre perception sensorielle et contrôle attentionnel (Menon et Uddin, 2010). Dès les premiers mois de vie, la perception sensorielle est mobilisée pour découvrir le monde qui entoure le nouveau-né et constitue le fondement des premiers processus cognitifs. Par ailleurs, un traitement atypique de l'information sensorielle est fréquemment rapporté dans de nombreux TND en parallèle de dysfonctionnements exécutifs (Cascio, 2010). Si les réseaux neuronaux de l'attention sont présents dès la naissance et soutenus par les premières expériences sensorielles, ne pourrions-nous pas considérer qu'un traitement de l'information sensorielle atypique puisse être un marqueur précoce de trouble ?

Résumé du chapitre 2

Au regard de la prévalence accrue des TND en France et dans le monde, la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'apparition de ces troubles dès le plus jeune âge est un véritable enjeu de santé publique. L'attention exécutive est une composante commune au cœur de la symptomatologie de nombreux TND et ses altérations touchent différentes sphères du développement, persistant la plupart du temps jusqu'à l'âge adulte. En comparaison à des enfants au développement typique, sur des tâches et batteries évaluant différentes composantes exécutives, les enfants présentant un TND ont des performances plus faibles conjointement à un fonctionnement cérébral différent. Prendre conscience de la multiplicité des facteurs de risque associés à une trajectoire développementale atypique, permet de proposer dès le plus jeune âge des programmes de remédiation adaptés. La perspective d'une approche cross-syndromique semble pertinente pour appréhender les TND en raison d'un chevauchement des symptômes, en particulier les dysfonctionnements de l'attention exécutive.

Afin de répondre aux enjeux liés au dépistage précoce des TND, il est nécessaire de comprendre les fondements d'un développement cognitif atypique, qui témoignerait en période préscolaire de l'accroissement des difficultés attentionnelles liées aux exigences des apprentissages. Si les premières manifestations attentionnelles trouvent leurs origines dans la perception des informations de notre environnement, il n'est alors pas surprenant de retrouver ultérieurement au sein des TND des troubles de l'attention conjointement à des atypies sensorielles. Ainsi, comprendre les fondements sensoriels du développement cognitif précoce, pourrait permettre d'identifier des marqueurs de troubles dès le plus jeune âge.

Chapitre 3

Les fondements sensoriels du développement cognitif précoce

« Ce que je vois là n'est qu'une écorce.

Le plus important est invisible... »

Antoine de Saint Exupéry (1943)

Chapitre 3 - Les fondements sensoriels du développement cognitif précoce

1. Introduction

Comprendre les fondements du développement cognitif dès le plus jeune âge est un véritable défi pour expliquer les vulnérabilités précoces liées à l'expression de troubles neurodéveloppementaux. Selon le cadre théorique neuroconstructiviste du développement cognitif, les expériences sensorielles précoces contraignent la construction des réseaux cérébraux, qui se développent considérablement au cours des premières années de vie (Karmiloff-Smith, 2009). En effet, bien avant la naissance, nous faisons les premières expériences du monde qui nous entoure par la perception sensorielle. Elle est activement utilisée par le nouveau-né au cours des premières semaines de vie pour donner un sens au monde et former les premières représentations mentales. En effet, la détection et l'apprentissage de régularités sensorielles au sein de notre environnement permettent de former des modèles mentaux de l'environnement, et d'économiser nos ressources cognitives lors de futures expériences similaires. Ce mécanisme, que l'on nomme la prédiction sensorielle, permet d'anticiper les entrées futures sur la base des régularités de l'environnement et s'inscrit dans l'hypothèse du cerveau bayésien (Dehaene, 2018, 2020; Kouider et al., 2015). Prédiction sensorielle et attention exécutive sont deux mécanismes interconnectés qui jouent un rôle essentiel dans le traitement des informations provenant de notre environnement. Les prédictions sensorielles permettent l'orientation de l'attention vers les stimuli les plus probables et en retour l'attention exécutive facilite les prédictions pour se focaliser sur les éléments centraux de notre environnement. Des travaux récents conduits auprès de nouveau-nés à risque de TND mettent en évidence des capacités de prédiction sensorielle dans la modalité tactile (Dumont et al., 2022). Parmi les modalités sensorielles, le toucher, premier sens à se développer, constitue le fondement du développement sensoriel (Bremner et Spence, 2017). Pourtant, cette modalité est encore peu étudiée dans les travaux de recherche en psychologie, au profit d'autres modalités distales, en particulier l'audition et la vision.

Dans ce troisième chapitre, nous aborderons l'approche neuroconstructiviste du développement cognitif, depuis son émergence jusqu'à ses applications. Nous discuterons ensuite des fondements sensoriels du développement cognitif précoce, des modalités distales puis du système somatosensoriel, pierre angulaire du développement cognitif précoce, fréquemment altéré dans les TND. Enfin, nous suggérerons que le traitement sensoriel tactile

via le système de prédiction sensorielle pourrait servir de précurseur au développement de l'attention exécutive.

2. L'approche neuroconstructiviste du développement cognitif

Héritière des travaux piagétiens et néo-piagétiens, l'approche neuroconstructiviste du développement cognitif a émergé dans les années 1990 et propose une vision intégrative et multidimensionnelle du développement cognitif (Thomas et al., 2009). Cette théorie ne rejette pas les apports de la théorie piagétienne, mais vise à l'insérer au sein d'interactions bidirectionnelles entre l'individu, son environnement, l'expression de ses gènes et la construction de ses structures neurales. Dans ce cadre théorique, le développement de l'individu est constamment soumis à ces différentes influences et permet de témoigner des changements qui peuvent survenir au cours du développement.

2.1. Du modèle piagétien à l'approche neuroconstructiviste pour décrire le développement cognitif précoce

Selon une perspective biologique et psychologique, le développement de l'intelligence est conçu comme un mécanisme d'adaptation de l'organisme à son environnement par l'interaction de deux mécanismes clés : les principes d'assimilation et d'accommodation (Piaget, 1975a). L'assimilation désigne le processus d'intégration de schèmes suite aux interactions de l'individu avec une réalité extérieure (un objet, une personne). Les schèmes sont des constructions mentales permettant la réalisation d'une action et peuvent se modifier ou se généraliser en fonction des buts à atteindre. L'accommodation désigne la modification des schèmes à des fins adaptatives. Dans son ouvrage sur la naissance de l'intelligence, Piaget décrit la complémentarité de ces deux processus : « L'assimilation et l'accommodation, d'abord antagonistes dans la mesure où la première demeure égocentrique et où la seconde est simplement imposée par le milieu extérieur, se complètent l'une l'autre dans la mesure où elles se différencient, la coordination des schèmes d'assimilation favorisant les progrès de l'accommodation et réciproquement » (Piaget, 1975b). Le déséquilibre existant entre principes d'assimilation et d'accommodation, conduit à une réorganisation et un rééquilibrage des schèmes cognitifs, c'est le principe d'équilibration.

La rigueur méthodologique des travaux de Piaget n'a pas été mise à l'épreuve d'analyses statistiques et ses observations reposent sur des observations qualitatives auprès de petits échantillons d'enfants. L'ensemble de ses travaux ont cependant ouvert de nouvelles réflexions

et fourni un cadre explicatif du développement cognitif précoce, ouvrant la voie à de nouvelles approches comme les sciences cognitives (Montangero, 2001). Les notions piagétienne de structure cognitive à finalité générale, ont été rejetées par ce courant, avec entre autres la théorie de l'innéité des structures linguistiques de Chomsky (Chomsky, 1965) et les travaux de Fodor sur la modularité de l'esprit (Fodor, 1983). Ainsi le fonctionnement cognitif serait organisé en différents modules, chaque module ayant une fonction spécifique et le tout coordonné par un système central.

En parallèle de l'essor des sciences cognitives, de nombreuses connaissances fondamentales en psychologie du développement ont été remises en question avec les progrès réalisés dans l'observation des comportements des nourrissons. Par exemple, la permanence de l'objet décrite par Piaget en lien avec la mise en œuvre d'une coordination sensori-motrice autour de 8-9 mois, est montrée bien plus tôt par des paradigmes d'habituation et de réaction à la nouveauté (Baillargeon et Graber, 1987). Dans ces paradigmes de recherche, on va proposer au nourrisson de s'habituer progressivement à un stimulus familier, puis observer une réduction de son attention au cours des expositions. Une fois que le seuil d'habituation est atteint, on va introduire un nouveau stimulus, dont la forme, la couleur, la taille varient et observer la réaction comportementale. Si le nourrisson a perçu la différence entre les deux stimuli, il va engager à nouveau une réaction comportementale, une exploration sensorielle de la cible présentée. Ces paradigmes ont permis de faire évoluer les conceptions du nourrisson, longtemps perçu comme un réceptacle passif des informations qui lui parviennent.

Les travaux menés par Robert Siegler s'opposent à une vision linéaire du développement, envisageant le développement de l'intelligence par la mise en œuvre de stratégies cognitives qui se chevauchent et entrent en compétition (Siegler, 1989). Selon Elisabeth Spelke, les nouveau-nés disposeraient de « *core knowledge* », c'est-à-dire qu'ils seraient dotés de modules cognitifs existants, prêts à être mis en œuvre à la fin d'un processus de maturation prédéterminé (Spelke, 1998). Bien que ces noyaux de connaissance soient présents dès la naissance, ils peuvent interagir avec l'environnement et se développer davantage grâce à l'expérience et à l'apprentissage. L'application de techniques de neuroimagerie aux enfants et aux nourrissons a permis de répondre à ces questions latentes concernant la relation entre développement cérébral et émergence des capacités cognitives (Dehaene-Lambertz, 1997; Dehaene-Lambertz et Spelke, 2015; Kouider et al., 2013).

Les travaux initiés par Annette Karmiloff-Smith en psychopathologie développementale, vont notamment montrer que le syndrome de Williams, TND qui se caractérise, entre autres, par des traits faciaux spécifiques, une déficience intellectuelle légère

à modérée et des compétences sociales atypiques, résulte d'une interaction complexe entre des facteurs innés (altérations génétiques spécifiques) et environnementaux (expériences et interactions sociales de l'individu). En utilisant la méthode d'exploration des trajectoires développementales, ces travaux vont permettre de mieux caractériser les capacités de discrimination des visages dans ce syndrome (Karmiloff-Smith et al., 2004).

En résumé, l'ensemble des travaux menés en psychologie du développement depuis l'œuvre de Piaget ont montré toutes les limites de l'approche constructiviste du développement cognitif chez l'enfant. L'approche neuroconstructiviste considère une dynamique développementale à de multiples niveaux et accorde une fonction centrale aux facteurs influençant l'émergence des représentations mentales dans un cerveau en développement.

2.2. Principes fondamentaux de l'approche neuroconstructiviste

Théorie du développement cognitif qui a émergé dans les années 1990, le neuroconstructivisme vise à expliquer les différents mécanismes liés à l'évolution des représentations mentales sous l'influence des gènes, de l'environnement et des comportements propres à l'individu (Karmiloff-Smith, 1998; Karmiloff-Smith, 2006). Le neuroconstructivisme repose sur un principe central : la dépendance contextuelle, c'est-à-dire dans quelle mesure les structures neurales qui produisent les représentations mentales sont contextuellement dépendantes à de multiples niveaux : génétique, neural et cellulaire, cérébral, corporel et social (Thomas et Baughman, 2014).

Selon cette perspective, la trajectoire développementale de l'individu est le fruit d'interactions multidimensionnelles sur les différents niveaux précédemment décrits (Figure 18). Ainsi, les TND ne sont pas considérés comme des dysfonctionnements de modules cognitifs spécifiques, mais plutôt comme résultant de contraintes à de multiples niveaux, orientant le développement vers une trajectoire atypique. Utiliser cette approche pour étudier la variabilité cognitive va à l'encontre de la méthode classiquement employée qui consiste à comparer à un moment donné du développement deux groupes de participants neurotypiques et porteur d'un TND (Annaz et al., 2008).

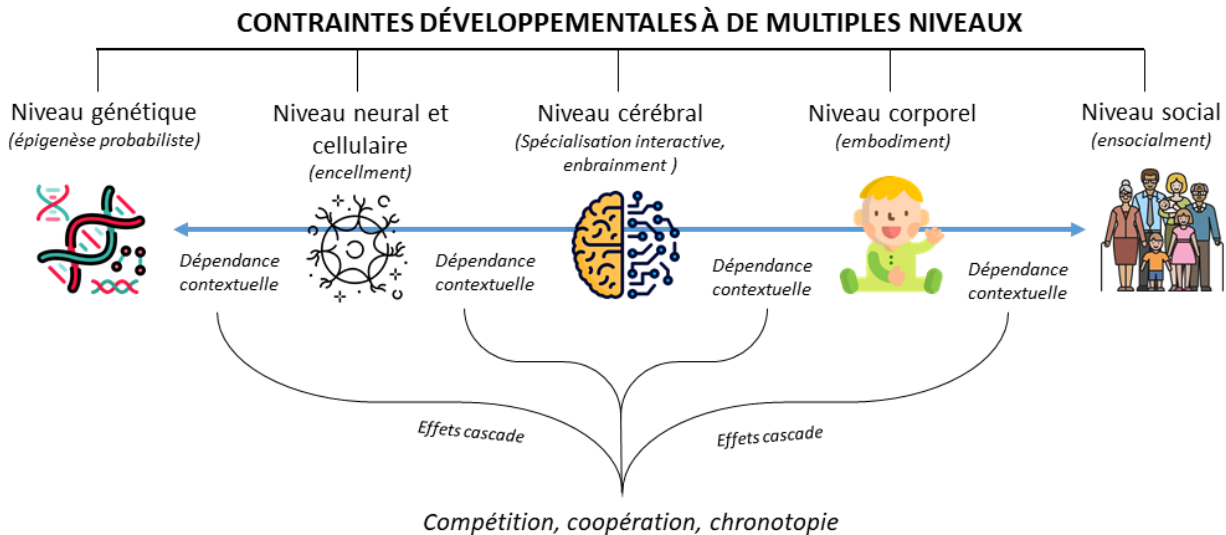


Figure 18. Principes de l’approche neuroconstructiviste du développement cognitif, traduit et adapté de Rinaldi et Karmiloff-Smith (2017).

L’approche neuroconstructiviste s’appuie sur le concept d’épigénèse probabiliste (Gottlieb, 2007). Alors que de nombreux travaux en biologie étaient conduits selon une perspective géocentrique, le modèle d’épigénétique probabiliste ajoute une dimension interactive dans la façon dont l’expression génétique peut être modifiée et contrainte par des facteurs non génétiques (Lickliter, 2008). L’environnement joue un rôle essentiel en modulant l’expression des gènes, ce qui signifie que différentes caractéristiques du génome peuvent être activées ou désactivées et ce à différentes étapes du développement. Cette approche considère aussi des interactions au niveau cellulaire (*encellment*), avec des transmissions entre les cellules nerveuses (neurones) et les cellules gliales qui façonnent la structure et le fonctionnement du système nerveux dès les premiers stades du développement fœtal.

Selon l’approche neuroconstructiviste, l’esprit est intégré dans un corps (*embodiment*) qui lui-même agit en tant qu’interface avec son environnement. Il agit aussi comme un filtre pour percevoir les informations sensorielles et contraint donc la construction des représentations mentales. Le corps sert également de support pour les premiers apprentissages afin de gérer de nouvelles expériences sensorielles, qui entraînent la construction de nouveaux réseaux neuronaux de plus en plus complexes. Ainsi, le corps n’est pas un réceptacle passif de flux d’informations, mais il sert à l’esprit qui le dirige à sélectionner et manipuler les différentes informations perçues au service de l’apprentissage.

L’environnement social (*ensocialment*) dans lequel l’enfant évolue a une influence considérable sur la construction des représentations mentales. La nature et la qualité des interactions familiales, puis des différents environnements avec lequel l’enfant va interagir, constituent de multiples contraintes et opportunités pour l’évolution de ces représentations

mentales. Par exemple, les effets positifs d'un attachement sécure sont bénéfiques pour le développement dans différentes sphères (cognitives, sociales, émotionnelles) alors qu'un attachement insécure/désorganisé augmente la vulnérabilité développementale vers des trajectoires développementales atypiques (Rees, 2007).

La relation entre cerveau et comportement (*enbrainment*) est décrite au sein de la théorie de la spécialisation interactive (Johnson, 2000). Cette théorie propose que les régions cérébrales soient non spécifiques au début du développement puis s'affinent progressivement par spécialisation fonctionnelle dans chaque région cérébrale de par l'exposition à l'environnement. Johnson (2011) pose différentes hypothèses prédictives en lien avec les concepts de spécialisation (S) et d'interactivité (I). Concernant les hypothèses liées à la spécialisation, l'exposition fréquente à certains stimuli entraîne une spécialisation fonctionnelle de réseaux neuronaux au cours du développement, pouvant être identifiés par des potentiels évoqués spécifiques en EEG (S1), et par conséquent réduire l'étendue des tissus corticaux activés au fur et à mesure de la spécialisation (S2). Ces deux hypothèses sont fortement corrélées et reposent sur les mêmes mécanismes sous-jacents (S3). À un âge donné, une région fortement spécialisée sera moins plastique après une lésion cérébrale ou une déprivation sensorielle contrairement à une région moins spécialisée (S4). Concernant les hypothèses liées à l'interactivité, les évolutions cognitives et comportementales au cours du développement sont associées aux évolutions de plusieurs régions cérébrales (I1). Le processus de spécialisation des réseaux et de sélectivité des régions s'étend en fonction des contextes (I2) et cette spécialisation des différentes régions sera façonnée par leur implication dans un ou plusieurs réseaux fonctionnels (I3).

Les mécanismes impliqués dans le développement sont soumis à des phénomènes de compétition, de coopération et de chronotopie. La compétition entre différentes représentations entraîne la spécialisation de composantes d'un système. La coopération renvoie à l'intégration de plusieurs composantes pour la réalisation d'une fonction commune. Enfin, le développement s'inscrit sur une ligne temporelle, les événements se produisent à un moment donné et dans un contexte précis, c'est le phénomène de chronotopie. L'ensemble de ces phénomènes contribuent à la trajectoire développementale d'un individu. L'étude des trajectoires développementales concernant la connectivité fonctionnelle entre les régions corticales chez des sujets au développement typique et dans le TSA à l'état de repos a permis de mettre en évidence des trajectoires développementales opposées concernant les connectivités fonctionnelles intrinsèques cortico-striatales, avec une connectivité en diminution ou constante avec l'âge chez les individus en développement typique et en augmentation dans le TSA. Les auteurs ont

également mis en évidence des corrélations comportementales négatives significatives entre une connectivité fonctionnelle intrinsèque cortico-striatale atypique et les symptômes autistiques, tels que les déficits de communication sociale et les comportements et intérêts restreints/répétitifs (Ma et al., 2022).

Déterminer des atypies dès le plus jeune âge est un véritable enjeu pour prédire l'évolution vers des trajectoires développementales atypiques. La revue de littérature conduite par Sansavini et collaborateurs (2021) met en évidence que les compétences perceptives, motrices et cognitives sont liées très tôt au cours du développement avec des effets en cascade dans plusieurs domaines sans rapport apparent. L'étude précoce de l'évolution des réseaux neuronaux soutient fortement les approches neuroconstructivistes du développement cognitif. En effet, dès les premiers jours de vie, la spécialisation des réseaux cérébraux va s'opérer, notamment, par le biais des expériences sensorielles avec l'environnement. En utilisant l'IRM fonctionnelle à l'état de repos à 30-32, 34-36 et 40-44 semaines de grossesse, Scheinost et collaborateurs (2022) ont investigué la connectivité fonctionnelle du réseau de la saillance, du réseau de mode par défaut et du réseau exécutif central auprès de 84 fœtus et nouveau-nés. Les résultats de cette étude ont mis en évidence une connectivité fonctionnelle inter-réseaux significative entre le réseau du mode par défaut et le réseau exécutif central dès 36 semaines, suggérant l'émergence précoce de la connectivité fonctionnelle inter-réseaux. Les auteurs ont également souligné un lien entre les interactions avec l'environnement relevés par la santé mentale maternelle et le développement du réseau de la saillance entre 30 et 44 semaines de grossesse. En résumé, les premières expériences du fœtus et du nouveau-né, qui sont sensorielles, supportent le développement des fonctions cognitives.

3. Le développement sensoriel : support du développement cognitif

Dès la vie fœtale, les expériences sensorielles contribuent à l'élaboration de représentations mentales qui sont constamment réactualisées afin d'économiser nos ressources attentionnelles limitées. Le toucher, premier sens à se développer, est à la base des premières activités perceptives (Bremner et Spence, 2017). Il est impliqué dans de nombreux aspects du développement (Cascio et al., 2019) et fréquemment altéré dans de nombreux TND (Cascio, 2010). Alors qu'il occupe une place fondamentale dans le développement cognitif, affectif, social et moteur, le traitement sensoriel tactile n'a été, à notre connaissance, que très peu étudié expérimentalement en psychologie.

Parmi les mécanismes impliqués dans le développement, la prédiction sensorielle a fait l'objet d'un intérêt grandissant auprès de populations vulnérables telles que les nourrissons nés prématurés, dans des modalités sensorielles distales telles que l'audition et la vision (Boldin et al., 2018; Emberson et al., 2017) et plus récemment chez les nouveau-nés dans la modalité tactile (Dumont et al., 2022). Dans une perspective neuroconstructiviste du développement cognitif précoce, nous suggérons qu'un traitement sensoriel atypique dans la modalité tactile puisse constituer un marqueur précoce de trajectoire développementale atypique, particulièrement celle de l'attention exécutive (Anquetil et al., 2023 ; voir Annexe 1).

3.1. Le toucher : un sens fondamental pour le développement perceptif et cognitif

3.1.1. *Émergence et développement du système somatosensoriel*

L'apport de recherches conduites sur la perception sensorielle dès la vie fœtale conjointement à l'essor de techniques d'explorations fœtales ont mis en évidence la mise en œuvre des systèmes sensoriels mais aussi des sensibilités à l'environnement fœtal riche en stimulations (Lecanuet et Schaal, 2002). L'évolution de ces connaissances a eu des incidences majeures sur les représentations de l'enfant avant sa naissance, tant par les parents que par les professionnels des services de néonatalogie. Ainsi, l'enfant ne part pas de zéro à la naissance. Dès la vie fœtale, les expériences précoces conduisent à des apprentissages prénataux (Lecanuet et al., 2004). Le développement des différents systèmes sensoriels ne suit pas la même temporalité, bien que la mise en œuvre d'un système sensoriel puisse en affecter un autre. Ainsi, se mettent en œuvre le système somatosensoriel (comprenant le système tactile, la proprioception, la nociception et la thermoception), puis le système vestibulaire, suivis des systèmes olfactifs et gustatifs, du système auditif et enfin du système visuel. Le système somatosensoriel, incluant le système tactile, est donc le premier à se mettre en œuvre, au cœur du développement perceptif et cognitif (Dumont et al., 2018).

Le système somatosensoriel comprend une large gamme de réseaux neuronaux permettant de reconnaître des objets, discriminer des textures, des formes, générer un retour sensori-moteur et échanger des signaux sociaux. Les récepteurs sensoriels tactiles sont distribués sur toute la surface du corps, en particulier la peau, pour discriminer différentes propriétés liées aux stimulations tactiles : la douleur, la température mais aussi des éléments comme la taille, la forme ou la texture du stimulus perçu (Abraira et Ginty, 2013). Parmi ces récepteurs, on retrouve, entre autres, les disques de Merkel et les corpuscules de Meissner, qui ont une étendue réduite de leurs champs récepteurs contrairement aux corpuscules de Pacini et

de Ruffini qui ont une plus vaste étendue et se situent dans le derme et le tissu sous-cutané (Feito et al., 2018) (Figure 19). Les informations tactiles sont ensuite transmises au système nerveux central par deux voies ascendantes majeures : la voie lemniscale (une voie de transmission rapide) et la voie antérolatérale (extra-lemniscale, une voie de transmission lente). La voie lemniscale est caractérisée par le trajet des signaux à travers les colonnes dorsales de la moelle épinière jusqu'à la partie caudale du bulbe rachidien. Les axones afférents établissent des connexions synaptiques avec les neurones de premier ordre présents dans les colonnes dorsales, où leurs fibres se terminent dans les noyaux correspondants. Les neurones de premier ordre envoient leurs axones vers le bulbe rachidien, où ils établissent des connexions synaptiques avec les neurones de deuxième ordre. Ces neurones de deuxième ordre projettent ensuite leurs axones vers le thalamus somesthésique, où les signaux sensoriels sont traités et relayés aux neurones de troisième ordre. Une partie des axones des neurones de troisième ordre se projette vers d'autres régions corticales, permettant une intégration plus complexe des informations sensorielles dans les fonctions cognitives et motrices.

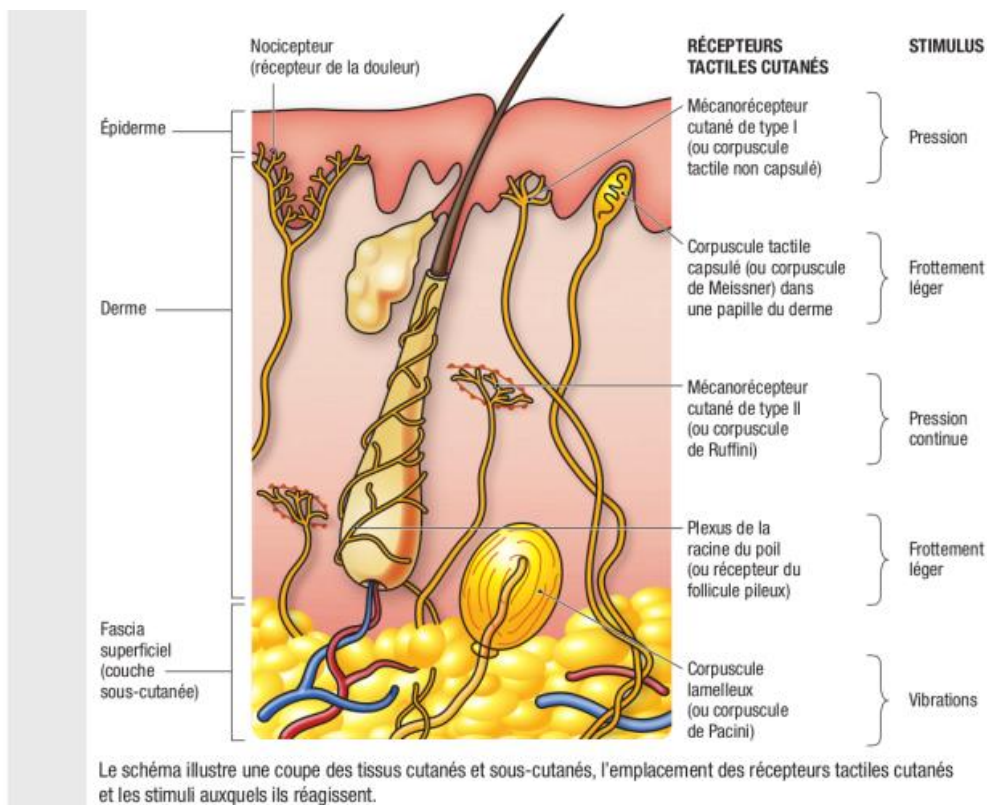


Figure 19. Répartition des récepteurs tactiles cutanés et les stimuli auxquels ils réagissent. Adapté de G.C. Tortora et B. Derrickson, *Éléments d'anatomie et de physiologie*, adaptation française de L. Martin et M. Forest, Montréal, Editions du renouveau pédagogique, 2009, p 290.

Le cortex somesthésique primaire est principalement situé dans le gyrus postcentral, qui se trouve juste derrière le sillon central du cerveau, le sillon de Rolando. Il est cartographié de manière topographique, où différentes parties du corps sont représentées dans des zones

spécifiques du cortex (Figure 20). Cette organisation permet une perception tactile et proprioceptive précise et intégrée. Cette cartographie est souvent représentée via l'homonculus cortical²⁰, dans lequel des parties spécifiques du corps sont représentées dans des zones bien définies du cortex somesthésique primaire, en fonction de leur sensibilité tactile et de leur complexité de mouvement. Le cortex somesthésique primaire interagit étroitement avec d'autres régions cérébrales pour fournir une perception globale et intégrée des sensations et des mouvements du corps. Parmi ces régions, on trouve le cortex somesthésique secondaire, qui reçoit des informations supplémentaires du cortex somesthésique primaire pour une analyse plus approfondie des sensations. Le cortex somesthésique secondaire joue un rôle dans l'intégration multimodale des informations somesthésiques et contribue à donner une signification globale aux sensations perçues.

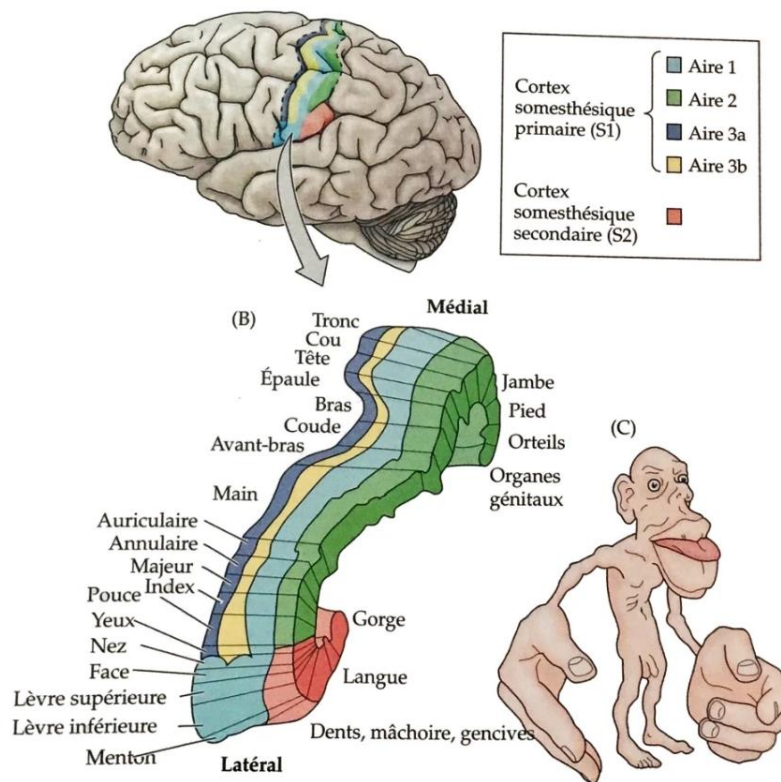


Figure 20. Organisation somatotopique du cortex somesthésique primaire chez l'homme et illustration de l'homonculus. Issu de Nadeau et al., (2006). *Neurosciences médicales*, ELSEVIER.

Cette conception organisée et fonctionnelle tend à de nouvelles discussions dans la littérature. Si des stimuli artificiels ciblent spécifiquement une seule classe d'afférents, la plupart des stimuli naturels sollicitent tous les types d'afférents et concernant les perceptions

²⁰ Cette représentation schématique ne correspond pas exactement à la réalité anatomique du corps humain, mais souligne l'importance de cette organisation somatotopique pour la perception tactile.

tactiles, elles résultent de l'interaction de multiples sous-modalités. Par ailleurs, en analysant les réponses corticales de manière plus approfondie, il en résulte que la plupart des neurones reçoivent des entrées convergentes provenant de plusieurs classes d'afférents (Saal et Bensmaia, 2014). Une étude plus récente a mis en évidence que la densité optimale d'afférents pour transmettre une information maximale dépend à la fois de la caractéristique tactile considérée et de la classe d'afférents, et que l'information est répartie dans différentes classes pour toutes les caractéristiques tactiles, chaque classe codant à la fois des informations redondantes et complémentaires par rapport aux autres classes d'afférents (Corniani et al., 2022).

Le fœtus a de nombreuses opportunités de contact tactile durant la grossesse par le contact avec le liquide amniotique et les parois de l'utérus mais aussi par le contact avec son propre corps (Ronca et Alberts, 2016). Vers 7 semaines de grossesse, les premiers récepteurs sensoriels de l'épiderme apparaissent vers la zone péribuccale, étendus vers 11 semaines à l'ensemble du visage, la paume des mains et la plante des pieds et à 20 semaines à l'ensemble du corps et des muqueuses (Segond, 2015). Les premiers travaux menés par Hooker (1938) auprès de fœtus avortés mettent en évidence une réactivité à des stimulations tactiles, en particulier les prémices du réflexe d'agrippement autour de 11 semaines et des réponses aux stimulations tactiles palmaire autour de 15 semaines. Les observations échographiques de fœtus mettent également en évidence des explorations tactiles des différentes parties du corps témoignant d'une auto-organisation des comportements fœtaux (Mori et Kuniyoshi, 2010). Des travaux menés auprès de nouveau-nés prématurés mettent en évidence qu'à 25 semaines, ils sont réactifs à différents types de stimulations tactiles (effleurement, application d'un souffle d'air, pression et pincement légers). Les études menées en électrophysiologie mettent en évidence que les voies somesthésiques afférentes sont fonctionnelles jusqu'au cortex primaire à 25 semaines de gestation (Granier-Deferre et Schaal, 2005).

Une continuité transnatale, c'est-à-dire l'évolution des comportements et expériences à travers différentes périodes de développement, est assurée entre les expériences tactiles précoces vécues durant la vie fœtale et les premières explorations tactiles de l'environnement après la naissance (Segond, 2008). Dès la naissance, les nouveau-nés interagissent avec leur environnement par la perception, en particulier la perception tactile. Bien que la plupart des auteurs s'accordent à dire que ces premières compétences constituent la base du développement cognitif ultérieur, les études en psychologie sont encore rares dans ce domaine et les capacités de perception tactile demeurent encore peu caractérisées (Dumont et al., 2018).

3.1.2. *Les compétences tactiles précoces : perception tactile active et passive*

On distingue différents types de perception tactile : la perception tactile active dite haptique, qui implique une activité exploratoire avec une composante motrice, et la perception tactile passive liée au fait d'être touché. Au travers des comportements d'agrippement, les travaux initiés par Rochat (1987) ont été les premiers à mettre en évidence une discrimination haptique des propriétés d'un objet chez des nourrissons âgés de 2 à 3 mois. Ils sont capables de moduler leur force de préhension des objets en fonction de leurs propriétés (substance dure ou substance molle). Ces capacités ont également été mises en évidence chez des nouveau-nés de trois jours concernant les textures (objet lisse ou objet granuleux) avec une modification des schémas exploratoires en fonction de la texture (Molina et Jouen, 1998). La perception haptique a également été montrée chez des nouveau-nés prématurés à partir de 33 SA (Lejeune et al., 2010). Dans cette étude, les nouveau-nés prématurés démontrent des capacités de discrimination d'objets de différentes formes (cylindre ou prisme), mais également des capacités d'habituation à une même forme présentée plusieurs fois. Ces activités exploratoires attestent qu'un nouveau-né n'est pas uniquement mu par des comportements réflexes. Au contraire, ces comportements permettent au nouveau-né d'acquérir des connaissances sur l'environnement qui l'entoure et contribuent à la construction des premiers processus cognitifs (Jouen et Molina, 2005).

D'autres travaux se sont également intéressés au transfert intermodal, c'est-à-dire, la communication d'informations acquises *via* une modalité sensorielle vers d'autres modalités sensorielles. Ce transfert permet de reconnaître des propriétés partagées *via* différentes modalités et permet d'aboutir à des connaissances unifiées des éléments de l'environnement. Les premières preuves d'un transfert toucher-vision ont été mises en évidence par Meltzoff et Borton (1979) auprès de nouveau-nés âgés de moins d'un mois. Deux formes précédemment explorées tactilement (tétine lisse *versus* tétine rugueuse) sont ensuite reconnues visuellement lorsque l'objet présenté correspond à ce qui a été précédemment exploré tactilement. Des explorations supplémentaires concernant le transfert intermodal toucher-vision ont été apportées par les travaux de Molina et Jouen (2001), démontrant que les nouveau-nés, après habituation tactile sur une forme, regardent plus longtemps une nouvelle forme que la forme présentée auparavant dans la modalité tactile.

Les stimulations tactiles passives constituent une grande partie des informations reçues par un nouveau-né, en particulier durant la période néonatale. Elles comprennent entre autres

les caresses, les bercements mais également les actes de soins. Si elles ne sont pas initiées directement par lui, ces stimulations induisent une réponse du bébé qu'elle soit physiologique, cérébrale ou comportementale (Rose et al., 1976). Par exemple, chez le nouveau-né prématuré, une réponse neurovasculaire dans le cortex somatosensoriel est observée durant une stimulation tactile passive de la main (Roche-Labarbe et al., 2014). Le toucher passif a été principalement étudié via les réponses d'orientation et les paradigmes d'habituation. Les réponses d'orientation impliquent le déploiement de ressources attentionnelles vers des stimuli saillants de l'environnement (Barry, 2009). L'habituation désigne la diminution de cette réponse d'orientation, lorsqu'un stimulus inoffensif et non pertinent est présenté de façon régulière (Thompson et Spencer, 1966). Une étude menée auprès de 61 nouveau-nés prématurés nés entre 32 et 34 semaines d'âge gestationnel (AG, exprimé en semaines d'aménorrhées) a caractérisé les réponses d'orientation comportementale à des stimuli tactiles passifs (Dumont et al., 2017). Mesurés à l'âge de 35 semaines d'AG corrigé (AGc), les participants étaient exposés à une séquence de stimulations vibrotactiles à intervalles fixes, composée de trois périodes différentes (familiarisation, test et contrôle) et leurs modalités variant en fonction du groupe expérimental (vibrations sur la paume de la main, vibrations sur l'avant-bras ou pas de vibration). Durant l'acquisition, les participants étaient filmés afin de coder *a posteriori* les mouvements consécutifs aux stimulations en termes de quantité, durée et latence d'apparition qui ont été combinés en un score d'orientation. Les résultats de cette étude ont mis en évidence des réponses d'orientation manuelles à des stimuli vibrotactiles qui diminuent significativement au cours de la séquence de stimulations, quelle que soit la localisation de la stimulation. Les nouveau-nés prématurés perçoivent également le changement de localisation de la stimulation et le changement d'intervalle entre les stimuli, ce qui n'avait encore jamais été démontré *via* cette modalité ni à un si jeune âge. De tels travaux ouvrent la voie à l'étude des précurseurs sensoriels des trajectoires neurodéveloppementales atypiques. En effet, nous allons voir à présent que la somesthésie est impliquée dans les symptômes des TND.

3.2. Des profils sensoriels atypiques affectant la modalité tactile dans les TND

Les relations entre traitement sensoriel et manifestations comportementales dans le cadre de TND ont été introduites par les travaux d'Anna Jean Ayres (Ayres, 1972; Ayres et Mailloux, 1981). Selon cette perspective, l'intégration sensorielle s'intéresse au traitement des informations sensorielles et à leur impact sur le développement et les comportements de l'individu. Pour illustrer ce concept, Ayres et Robbins (2005) proposent la métaphore

suivante²¹ : « L'intégration sensorielle est la catégorie la plus importante au sein du traitement sensoriel. Vous savez que les aliments nourrissent votre corps, mais qu'ils doivent être digérés pour cela. Vous pouvez considérer les sensations comme la "nourriture du cerveau" ; elles fournissent les connaissances nécessaires pour guider le corps et l'esprit. Mais sans un traitement sensoriel bien organisé, les sensations ne peuvent être digérées et nourrir le cerveau » (p. 6).

Selon cette perspective, le développement précoce des sens centrés sur le corps (tactile, vestibulaire et proprioceptif) serait une base pour le développement des autres sens, et les variations de traitement sensoriel auraient des incidences sur les manifestations comportementales en fonction des seuils de traitement neurologique. Le système nerveux central joue un rôle essentiel dans la réception, l'organisation et l'interprétation des informations sensorielles provenant des sens. Le cerveau intègre ces différentes informations sensorielles pour produire une perception globale permettant aux individus de répondre efficacement à leur environnement. Une bonne intégration sensorielle permet de réagir de manière appropriée aux stimuli sensoriels, de contrôler les comportements, et de développer pleinement les apprentissages. Toutefois, lorsque le processus d'intégration sensorielle est perturbé, cela engendre des difficultés à traiter efficacement les informations sensorielles de notre environnement. Un traitement sensoriel atypique induirait des manifestations comportementales telles que des réactions excessives ou inadaptées aux stimuli, des problèmes de coordination motrice, des troubles de l'attention et de l'apprentissage, ainsi que des difficultés dans les interactions sociales.

L'approche développée par Ayres est principalement utilisée dans le champ de l'ergothérapie et de la psychomotricité. Elle fait par ailleurs l'objet d'une thérapie et d'une formation brevetée *Ayres Sensory Integration* (ASI). Des échelles permettant d'évaluer l'intégration sensorielle chez l'enfant de 4 à 8 ans ont également été créées, telles que le *Sensory Integration and Praxis Test*, qualifiant les comportements sensoriels dans différents contextes ou bien le *Sensory Processing Measure* (SPM-2), hétéroévaluation complétée par les parents. Aussi prometteuse que fût la théorie d'Ayres, elle ne permettait pas d'identifier des dysfonctionnements précoces au niveau du traitement sensoriel sur le plan cérébral. Toutefois, elle soulignait déjà de manière très pertinente l'importance du traitement et de l'intégration

²¹ Traduction de l'extrait de l'ouvrage *Sensory Integration and the Child: Understanding Hidden Sensory Challenges* (2005) : « *Sensory integration is the most important type of sensory processing. You know that food nourishes your body, but it must be digested to do so. You can think of sensations as "food for the brain"; they provide the knowledge needed to direct the body and the mind. But without well-organized sensory processing, sensations cannot be digested and nourish the brain.* » (p.6).

sensorielle pour la construction des réseaux cérébraux, et offrait déjà une perspective neuroconstructiviste sans pour autant s’y référer.

L’étude des profils sensoriels est également employée en clinique et en recherche pour qualifier le traitement sensoriel dans des situations quotidiennes. L’un des outils le plus utilisé dans le champ de la recherche est le questionnaire du Profil Sensoriel de Dunn²² (Dunn et Brown, 1997), complété par un parent ou un proche de l’enfant. Cet outil distingue sur un continuum les seuils neurologiques de l’individu (d’un seuil neurologique élevé à un seuil neurologique bas) et les réponses comportementales associées (des réponses comportementales passives à des réponses comportementales actives). Ces deux axes définissent quatre quadrants permettant de distinguer, d’après l’auteur, quatre styles de profils sensoriels : hyposensibilité sensorielle, hypersensibilité sensorielle, recherche de sensations, ou évitement de sensations.

Dans la symptomatologie des TND, une dysharmonie entre les seuils de réponses neurologiques et les réponses comportementales *via* le Profil Sensoriel est fréquemment rapportée (Dunn, 2001). La revue de littérature de Zoenen et Delvenne (2018) souligne la prévalence de troubles sensoriels dans de nombreux TND et pas seulement dans le TSA et le TDA/H, bien que ces deux derniers aient été majoritairement investigués. Concernant les TDA, les auteurs formulent que les apprentissages reposent sur des intégrations de multiples informations sensorielles et qu’un traitement sensoriel non optimal pourrait conduire à des difficultés d’apprentissage. Une étude menée auprès d’un échantillon d’enfants d’âge préscolaire avec et sans troubles de la coordination motrice a mis en évidence que les enfants avec des troubles moteurs présentent des profils sensoriels atypiques dans différentes modalités dont le traitement de l’information tactile, le traitement de l’information auditive et orale ainsi que le système vestibulaire (Mikami et al., 2021). De plus, les particularités sensorielles dans les modalités tactiles et auditives concernant la sensibilité sensorielle et l’évitement de sensations sont associées aux difficultés de coordination motrice uniquement chez les enfants avec les troubles de la coordination motrice. Ils seraient en difficulté pour percevoir les différentes informations sensorielles et pour les intégrer afin de former des modèles internes cohérents qui peuvent ensuite être réutilisés dans différents contextes (Allen et Casey, 2017). D’après les réponses fournies à une version chinoise du Profil Sensoriel, on observe chez les enfants porteurs d’un TSA une diminution des problèmes de traitement de l’information sensorielle entre 6 et 12 ans tandis que les enfants porteurs d’un TDA/H présentent le *pattern*

²² Cet outil sera davantage détaillé dans la partie Méthode au sein des contributions expérimentales de ce travail de thèse.

inverse dans de nombreux aspects du traitement de l'information sensorielle (Cheung et Siu, 2009).

Une étude menée auprès d'un échantillon d'enfants présentant un TDA/H a mis en évidence des particularités dans le traitement sensoriel tactile avec une réponse électrodermale accrue aux stimulations tactiles en comparaison d'enfants au développement typique (Mangeot et al., 2001). Ces données convergent vers les réponses fournies par les parents au travers d'hétéro-questionnaires, qui rapportent des différences de traitement sensoriel tactile à la version abrégée du Profil Sensoriel contrairement aux enfants au développement typique. Les résultats de cette étude montrent également une variabilité dans le traitement sensoriel de manière générale. L'étude de Ghanizadeh (2008) a également montré des spécificités du traitement sensoriel tactile (en particulier l'hypersensibilité sensorielle tactile) auprès d'enfants présentant un TDA/H avec troubles oppositionnels.

Si l'importance de l'intégration sensorielle a été davantage qualifiée par Ayres et que les travaux de Dunn concernant les profils sensoriels sont venus mettre en évidence l'impact d'un traitement sensoriel atypique, leurs outils ne permettent pas pour autant de qualifier l'activité neuronale associée à ces comportements atypiques. Ces données comportementales ont ouvert la voie à de nouvelles recherches portant sur l'identification de marqueurs neuronaux spécifiques *via* l'étude des potentiels évoqués somatosensoriels chez les populations au développement typique et atypique.

3.3. Identification de marqueurs neuronaux liés à un traitement sensoriel atypique

Une augmentation de l'amplitude des potentiels évoqués somatosensoriels (SEP) est mise en évidence dans le TDA/H (Parush et al., 2007). Dans le TSA, on observe une diminution de l'amplitude et une latence plus courte (Espenhahn et al., 2021). Ces modifications semblent associées à une altération de la discrimination et de la sensibilité tactile, provoquant de l'anxiété et des comportements sociaux inadaptés. Il est particulièrement intéressant de constater que les différences de SEP sont corrélées à la réactivité tactile rapportée par les parents, tant chez les enfants atteints de TSA que chez les enfants typiques, ce qui soutient une approche dimensionnelle des TND et de leurs précurseurs somatosensoriels. Par ailleurs, des études longitudinales menées auprès de nouveau-nés prématurés ont montré que le traitement sensoriel était prédictif du développement cognitif ultérieur et de l'apparition de symptômes de TSA à partir de l'âge de deux ans (Vlaeminck et al., 2020).

Dans l'étude de Parush et collaborateurs (2007), les auteurs ont identifié d'un point de vue comportemental et neural la qualité du traitement sensoriel tactile chez des enfants âgés de 5 à 11 ans présentant un TDA/H en comparaison à un groupe contrôle. En fonction des réponses parentales fournies à l'inventaire *Touch Inventory for Preschoolers* (TIP) (Royeen, 1985) et aux scores de réactivité sensorielle évalués par les expérimentateurs, ils ont réparti les enfants présentant un TDA/H en deux groupes : ceux avec défense tactile (TDA/H/DT+) et ceux sans défense tactile (TDA/H/DT-). De manière générale, les enfants présentant un TDA/H ont des scores de réactivité sensorielle globale significativement plus élevés que ceux du groupe contrôle. Concernant l'amplitude des SEP, les enfants présentant un TDA/H se distinguent en comparaison du groupe contrôle. Plus spécifiquement, des amplitudes plus larges sont rapportées dans le groupe TDA/H/DT+ et corrélées avec les scores de réactivité tactile. Les résultats de cette étude mettent en évidence une part importante de troubles du traitement tactile au sein des TND, qui peuvent être considérés comme une entité à part entière, caractérisée par des réponses physiologiques anormales aux stimuli somatosensoriels, en lien avec des perturbations de l'inhibition neuronale.

Les troubles de la perception tactile semblent spécifiques des TND et non de tous les problèmes de comportement. Mammen et al. (2015) ont constaté que l'évitement tactile chez les nourrissons de 9 mois n'était pas prédictif des déficits de régulation des émotions à 18 mois (ni des symptômes d'internalisation ou d'externalisation), mais qu'il était prédictif des symptômes des troubles envahissants du développement. Si la symptomatologie des TND comprend à la fois des particularités sensorielles et des dysfonctionnements exécutifs, et que le développement sensoriel dans la modalité tactile est la fondation du développement cognitif, alors il semble pertinent de rechercher des mécanismes liant ces derniers dans une perspective neuroconstructiviste du développement cognitif. Même avant l'âge d'un diagnostic possible, les profils sensoriels anormaux sont également plus fréquents chez les enfants à haut risque de TND en raison d'une naissance prématurée (Wickremasinghe et al., 2013). Les nouveau-nés bénéficiant d'une prise en charge dans les unités de néonatalogie, ainsi ils sont davantage exposés à des stimulations tactiles, parfois aversives et douloureuses, dans un environnement imprévisible (Koenig-Zores et Kuhn, 2016). Dès le premier mois de vie, une exposition répétée à des stimulations douloureuses modifie les réponses cérébrales à des stimulations tactiles passives en comparaison à des nouveau-nés à terme (Maitre et al., 2017).

Dans une étude comparative menée chez des nourrissons nés prématurés et à terme âgés de 6 et 12 mois, Machado et collaborateurs (2022) ont investigué comportement adaptatif et

réponse corticale aux stimuli tactiles à l'aide de la fNIRS. Chez les nourrissons nés prématurés, une réactivité tactile plus faible est constatée à l'âge de 6 mois, ce qui n'est pas retrouvé à l'âge de 12 mois. Les réponses corticales aux stimuli tactiles sont également différentes en fonction de l'âge. À 6 mois, une réponse corticale au stimulus tactile a été observée dans le cortex sensorimoteur primaire dans les deux groupes de nourrissons sans différence significative. À 12 mois, une réponse corticale est observée dans le cortex sensorimoteur primaire, la zone prémotrice et la zone associative somatosensorielle, avec une réponse significativement moins fréquente dans la zone prémotrice chez les nourrissons nés prématurément. Ces résultats semblent concorder avec une approche neuroconstructiviste des TND, témoignant d'influences précoces multiples ayant des répercussions sur la construction d'une trajectoire développementale atypique.

Comme abordé dans le chapitre précédent concernant les troubles de l'attention exécutive au cœur des TND, les travaux menés en imagerie fonctionnelle auprès d'enfants et adolescents porteur d'un TSA, ont révélé en parallèle des troubles sensoriels, une suractivation du réseau de saillance neuronale, suggérant un surinvestissement des ressources attentionnelles en faveur du traitement sensoriel de base (Green et al., 2016) conjointement à des suractivations neuronales du réseau du mode par défaut (Qin et al., 2022). La surcharge sensorielle ne permettrait pas à l'enfant de s'investir dans les interactions sociales et favoriserait des routines comportementales plus rigides. Baranek et collaborateurs (2018) proposent que les troubles du traitement tactile ne soient pas un corrélat mais un précurseur de particularités comportementales rapportées dans le TSA. Cependant, aucune étude n'a encore mis en évidence de relation entre les performances de traitement tactile et les performances cognitives pour déterminer quels aspects du traitement tactile sont impliqués dans l'apparition de troubles de l'attention exécutive au sein des TND.

4. La prédiction sensorielle : un mécanisme clé au cœur de la perception et la cognition

La théorie du codage prédictif offre une conception de la cognition basée sur l'hypothèse du cerveau bayésien, visant à expliquer comment les entrées sensorielles sont traitées et plus généralement comment le cerveau fonctionne de manière intrinsèquement prédictive (Friston, 2005). Cette théorie fournit une base pour comprendre les deux phénomènes de prédiction sensorielle et de suppression par répétition (la suppression de la réponse cérébrale à un stimulus

répété et inoffensif). Les réponses neuronales aux stimuli peuvent être renforcées ou atténuées en fonction de leur prévisibilité et de leur pertinence par rapport aux besoins du sujet.

Principalement étudiée dans les modalités distales de façon unimodale et intermodale auprès de nourrissons (Emberson et al., 2015, 2017; Kouider et al., 2015), la prédiction sensorielle a fait l'objet d'un intérêt récent dans la modalité tactile auprès de nouveau-nés prématurés (Dumont et al., 2022). Des déficits de prédiction sensorielle dans la modalité tactile pourraient alors constituer un marqueur neurodéveloppemental pertinent pour identifier précocement des enfants à risque de trajectoire développementale atypique, en particulier concernant le développement de l'attention exécutive.

4.1. La théorie du codage prédictif pour comprendre le développement cognitif précoce

Développée par Friston à l'aube des années 2000, la théorie du codage prédictif prend ses origines dans les travaux sur l'intelligence artificielle et les sciences cognitives. Selon cette perspective, le cerveau humain traite l'information et prend des décisions en utilisant des principes probabilistes et statistiques basés sur la théorie bayésienne. Les informations provenant des entrées perceptuelles de bas niveau sont traitées par les aires sensorielles et transmises aux aires de traitement de haut niveau (traitement *bottom-up*), tandis que les processus de haut niveau produisent un modèle interne en apprenant les caractéristiques des stimuli présentés et génèrent des prédictions de rétroaction (traitement *top-down*) (Rauss et Pourtois, 2013). Ainsi, le cerveau humain comparerait constamment les nouveaux stimuli sensoriels provenant des cortex primaires avec les modèles internes construits par les cortex d'ordre supérieur à partir des entrées sensorielles précédentes. Si l'entrée correspond à la prédiction, le cerveau stabilise le modèle mental du stimulus en apprenant ses caractéristiques, sinon, une erreur de prédiction est générée pour mettre à jour le modèle probabiliste. La différence entre la prédiction effectuée et l'entrée sensorielle réelle, appelée erreur de prédiction, est transmise aux cortex d'ordre supérieur et permet d'affiner la qualité des prédictions ultérieures (Bubic et al., 2010). Intégrée dans une perspective neuroconstructiviste du développement cognitif, cette théorie permet de fournir un cadre explicatif pertinent pour témoigner de la relation entre traitement sensoriel, intégration et apprentissage neural, ainsi que les réponses comportementales associées. Dès le plus jeune âge, la prédiction sensorielle permet à un cerveau encore immature de former des attentes et d'économiser ses ressources attentionnelles à partir des informations provenant de l'environnement (Schubotz, 2015).

La suppression par répétition (SR) est un mécanisme qui découle de la prédiction sensorielle, conséquence de la stabilité du modèle interne (Grill-Spector, 2006). L'activité cérébrale va diminuer au travers des répétitions successives d'un même stimulus pour permettre la mobilisation des ressources cognitives sur d'autres entrées sensorielles potentielles (Nordt et al., 2016). Les études menées dans la modalité auditive concernant la perception de régularités temporelles ont été les premières à mettre en évidence chez des nouveau-nés des capacités de prédiction sensorielle par l'analyse des potentiels évoqués cérébraux, notamment *via* des paradigmes de type *oddball* (Kouider et al., 2015). Ces paradigmes consistent à présenter une séquence de stimuli répétés de façon identique, dans laquelle on introduit des stimuli déviants, c'est-à-dire dont les paramètres changent pour générer une erreur de prédiction. Le stimulus déviant violerait ainsi la prédiction basée sur le modèle mental construit à partir des stimuli répétés régulièrement. Les paradigmes d'omission permettent également de générer une erreur de prédiction. Dans ce cas, on va présenter une séquence de stimuli répétés de façon identique, mais cette fois-ci, au lieu de présenter un stimulus déviant, aucun stimulus ne sera présenté.

Cette capacité est observable dès la naissance dans la modalité auditive (Háden et al., 2015). Dans cette étude, deux blocs de stimuli auditifs étaient proposés aux nouveau-nés : un bloc au rythme lent et un bloc au rythme rapide. 170 séries composées chacune de 8 à 24 tonalités randomisées étaient présentées et chaque série se terminait par un intervalle inter-stimuli silencieux. Les réponses EEG ont été mesurées au début de la séquence, au changement d'intervalle dans une série et au moment où une tonalité est attendue en fin de séquence. Les réponses en cours de séquence ont également été enregistrées pour chaque bloc afin d'obtenir une comparaison pour le bloc au rythme lent et le bloc au rythme rapide. Les réponses au début du bloc ont été comparées aux réponses du bloc au rythme lent tandis que les réponses au changement d'intervalle et à la fin du bloc ont été comparées aux réponses dans le bloc au rythme rapide. L'analyse des potentiels évoqués cérébraux a mis en évidence une réponse négative précoce (N1) suivie d'une réponse positive (P2) avec des maxima frontocentraux en début de bloc, une réponse négative précoce (N1) frontocentrale pour les changements de taux de présentation et une réponse synchronisée avec le début attendu de tonalité avec une onde positive précoce largement distribuée suivie d'une onde négative. Les résultats de cette étude témoignent ainsi de la capacité des nouveau-nés à détecter le changement de rythme au cours de la séquence mais également de leur capacité à saisir les propriétés temporelles de la séquence et à générer des erreurs de prédiction. Si les travaux commencent à fleurir chez les nouveau-nés pour caractériser la prédiction sensorielle, peu de travaux ont étudié son fonctionnement

durant l'enfance alors qu'à cette période, le développement cognitif subit des changements importants.

Au travers des réponses aux omissions dans un paradigme d'omission auditive et motrice, Dercksen et collaborateurs (2022) ont étudié les réponses cérébrales en EEG chez des enfants âgés de 6 à 8 ans en comparaison à des adultes. Assis face à un écran, les enfants devaient appuyer sur un bouton tout en regardant une séquence vidéo. Si le bouton était pressé trop rapidement (< 600 ms) un lapin apparaissait à l'écran, si le bouton était pressé trop lentement (> 2000 ms) un escargot apparaissait à l'écran. Dès que l'un ou l'autre de ces stimuli disparaissait, l'expérience pouvait reprendre. Le fait d'appuyer sur un bouton, déclenchait également un son, distribué selon deux conditions expérimentales différentes : une condition son seul et une condition son aléatoire. Le fait d'appuyer sur le bouton entraînait un son (sans délai) dans 85% des essais et sur les 15% des essais restants, le son était omis de façon aléatoire. Dans la condition son seul, lors de chaque essai, le même son est présenté. Dans la condition son aléatoire, les sons changeaient à chaque essai. Une condition contrôle avec uniquement une réponse motrice sans son était également incluse dans la séquence. Les blocs sonores comprenaient 220 essais sonores et 40 essais d'omission, et les blocs de contrôle moteur comprenaient 100 essais. Au total, la tâche comprenait 8 blocs expérimentaux randomisés (3 blocs avec sons uniques, 3 blocs avec sons aléatoires, 2 blocs de contrôle moteur). Les auteurs cherchaient à mettre en évidence le potentiel évoqué cérébral observé dans les paradigmes de prédiction sensorielle auditive à savoir la composante oN1 liée à l'omission (Dercksen et al., 2020). Les résultats ont mis en évidence, d'une part, la présence d'une prédiction sensorielle auditive chez des enfants âgés de 6 à 8 ans et d'autre part une amplitude plus accrue de la réponse oN1 chez les enfants en comparaison aux adultes, probablement en raison de la plus grande spécificité de prédiction chez les adultes. De plus, l'amplitude de la réponse oN1 était plus importante dans la condition son unique par rapport à la condition son aléatoire. Les enfants témoignent d'une capacité à moduler leurs prédictions en fonction des stimuli auditifs présentés, suggérant une place importante de la prédiction sensorielle dans les apprentissages et la régulation comportementale.

Des hypothèses théoriques en lien avec la théorie du codage prédictif suggèrent des altérations dans les mécanismes de prédiction sensorielle qui pourraient témoigner de la symptomatologie rapportée dans des TND, en particulier le TSA (Sinha et al., 2014; Van de Cruys et al., 2014). En comparant les réponses cérébrales liées à une prédiction sensorielle dans la modalité auditive auprès d'un groupe de participants présentant un TSA en comparaison à

des participants au développement typique, van Laarhoven et collaborateurs (2020) ont mis en évidence des réponses cérébrales liées aux omissions accrues chez les profils présentant un TSA. L'étude de Gonzalez-Gadea et collaborateurs (2015) a également mis en évidence des réponses cérébrales spécifiques chez des enfants et adolescents présentant un TSA et un TDA/H durant un paradigme *oddball* dans la modalité auditive. En comparant l'activité neuronale en EEG chez des patients présentant un TDA/H et un TSA pour des stimuli auditifs attendus ou inattendus, les auteurs ont observé des réponses frontales opposées. Les patients ayant un TSA auraient une activité frontale accrue aux stimuli attendus et une activité réduite aux stimuli inattendus, tandis que les patients ayant un TDA/H présentaient le schéma inverse. En d'autres termes, les patients présentant un TSA semblent consacrer plus d'attention aux événements prévisibles, tandis que les patients présentant un TDA/H favoriseraient les événements imprévus. De tels résultats ont également été mis en évidence auprès de nouveau-nés prématurés nés entre 30 SA et 34 SA dans un paradigme *oddball* (Edalati et al., 2022). Des stimuli auditifs ont été proposées sur trois blocs expérimentaux : un bloc test comprenant des essais sonores réguliers entrecoupés d'essais déviants peu fréquents et deux blocs contrôle avec des essais déviants uniquement pour servir de référence dans l'analyse des potentiels évoqués cérébraux. La violation du rythme est également perçue par les nouveau-nés prématurés, avec un potentiel évoqué cérébral spécifique, la négativité de discordance (MMN), observé en région fronto-centrale et pas uniquement dans les aires auditives primaires. Ces résultats suggèrent que le traitement des stimuli déviants englobe une hiérarchie de structures corticales plus étendue, dans un flux d'informations ascendantes et descendantes, tout comme chez l'adulte.

Les interprétations liées à la présence d'altérations de prédiction sensorielle semblent converger : l'erreur de prédiction constante empêcherait la formation de modèles stables, et conduirait à de faibles prédictions, une allocation atypique des attentionnelles et des perceptions sensorielles altérées.

4.2. Prédiction sensorielle et attention exécutive

L'activité neuronale de prédiction est impliquée dans de nombreux processus, notamment l'attention et le contrôle cognitif (Schröger et al., 2015). Les interactions entre attention et prédiction sont débattues dans la littérature avec des résultats controversés. Certains auteurs mettent en évidence que l'attention module la prédiction sensorielle en réduisant l'erreur de prédiction *via* la SR (Jiang et al., 2013; Kok et al., 2012). D'autres auteurs, au contraire, ne parviennent pas à établir de conclusions probantes (Alilović et al., 2019). Les

paramètres faisant varier l'attention et la prédiction sont parfois confondus ou non clairement rapportés dans les études, pouvant conduire à des erreurs d'interprétation sur leurs rôles et fonctions respectifs. Pour identifier spécifiquement l'interaction entre l'attention et la prédiction sensorielle, la plupart des protocoles expérimentaux manipulent l'attention accordée face au degré d'attente des participants en présence de stimuli visuels ou auditifs.

Summerfield et collaborateurs (2008) ont étudié la SR en IRMf dans le cortex visuel chez des sujets adultes. Le protocole faisait appel à la reconnaissance de visages présentés par paires, soit deux fois le même visage, soit de deux visages différents, selon un protocole où l'alternance des visages était plus fréquente dans certains blocs, tandis que la répétition des visages était plus fréquente dans d'autres blocs. La SR a été mise en évidence dans l'aire fusiforme des visages dans les deux conditions expérimentales mais davantage accentuée lorsque la répétition était plus attendue. Cette même équipe de recherche a répliqué l'étude précédente en utilisant l'EEG et a également constaté une suppression plus forte de la réponse neurale au niveau des électrodes centrales lorsque la répétition était attendue (Summerfield et al., 2011). Larsson et Smith (2012) ont modifié le protocole utilisé par Summerfield et collaborateurs dans leur étude de 2008 pour tester en IRMf l'effet de l'attention sur le traitement des visages. Pour faire varier les paramètres attentionnels, l'attention était soit directement dirigée vers le stimulus cible, soit détournée de celui-ci en proposant un traitement périphérique de stimuli visuels. Dans cette condition attention détournée, les sujets devaient compter le nombre de lettres cibles "X" dans un flux rapide de lettres distractrices affichées au centre de l'écran. Les résultats de cette étude suggèrent que, lorsque l'attention était volontairement détournée des stimuli, les effets d'attente disparaissaient complètement mais la SR était toujours mise en évidence. En ce sens, le maintien actif de la SR modulé par notre attention dans l'attente d'un stimulus permettrait d'optimiser la qualité de nos prédictions et de nos réponses comportementales.

Plus récemment, Smout et collaborateurs (2019) ont découvert qu'une signature neurale d'erreur de prédiction, la négativité de discordance visuelle (vMMN), n'était pas mise en évidence en l'absence d'attention endogène sur les stimuli. La vMMN est une forme spécifique de potentiel évoqué généralement observé en EEG en réponse à des stimuli visuels inattendus ou qui diffèrent des stimuli attendus. Son appellation est très fortement associée à la négativité de discordance (*Mismatch Negativity*, MMN), potentiel évoqué, comme nous l'avons vu, observé dans le domaine auditif en réponse à des sons inattendus. Dans ce paradigme de détection de cibles, les participants étaient invités à réaliser deux sessions expérimentales faisant varier le niveau d'attention mais aussi la prévisibilité des stimuli présentés avec les

orientations de grilles qui pouvaient être soit prévisibles, soit surprenantes, soit imprévisibles. Les participants avaient pour consigne de fixer le centre de l'écran sur lequel était présenté un flux périodique de motifs en grilles. L'attention était manipulée en demandant aux participants de surveiller soit les stimuli grilles pour détecter des cibles rares avec une fréquence différente (tâche des grilles) impliquant une surveillance permanente, soit d'ignorer les stimuli grilles et de surveiller à la place des cibles rares, à savoir un point de fixation avec un contraste diminué (tâche des points) impliquant une absence de surveillance de grilles. Pour la tâche des grilles (*grating task*), les participants ont été informés qu'environ 1 grille sur 20 serait une grille cible avec une fréquence plus élevée que les grilles non cibles, et on leur a demandé d'appuyer sur un bouton le plus rapidement possible lorsqu'ils détectaient une grille cible et d'ignorer les autres grilles. Pour la tâche des points (*dots task*), les participants ont été informés que le point de fixation diminuerait occasionnellement en contraste, et on leur a demandé d'appuyer sur un bouton le plus rapidement possible lorsqu'ils détectaient un tel changement. Les auteurs ont constaté que les stimuli surprenants ont provoqué des réponses neurales qui étaient encodées en fonction de la différence entre les caractéristiques du stimulus prédit et de celui observé (par un stimulus déviant qui génère une erreur de prédiction), et que l'attention a facilité l'encodage de ce type d'information. Ces résultats mettent en évidence une absence de réponse neurale liée à la SR en l'absence d'attention endogène, autrement dit en l'absence d'attention exécutive. Ils ont été répliqués par Male et O'Shea (2023). Ainsi, l'attention exécutive optimiserait la précision attendue des prédictions sensorielles en augmentant le gain des erreurs de prédictions. L'efficacité de l'attention exécutive, permettrait d'optimiser le degré de certitude des prédictions sensorielles (Feldman et Friston, 2010).

Dans un paradigme informatisé nécessitant de discriminer la catégorie de stimuli cibles, des visages ou des mots, Peñalver et collaborateurs (2023) ont fait varier les informations relevant de la pertinence (attention) ou de la probabilité (attente) auprès de jeunes adultes. La tâche consistait à indiquer le sexe/genre de la cible (homme ou femme) et les participants devaient appuyer sur l'une des deux touches d'un clavier ("a", "l") pour indiquer si la cible appartenait ou non au genre indiqué au début de chaque bloc. Dans les blocs "Attention", l'indice indiquait la catégorie de stimulus pertinente à sélectionner (soit les visages, soit les noms). Si le stimulus cible appartenait à la catégorie pertinente (50% des essais, ciblé), le participant devait effectuer la tâche de discrimination du genre sur la cible. Autrement, les participants devaient répondre "non" indépendamment du sexe/genre du stimulus (catégorie non pertinente). Ainsi, dans cette condition, les participants devaient fournir une réponse à tous

les essais et être prêts à effectuer la tâche de jugement de genre, avec une probabilité de 50%. Dans les blocs "Attente", l'indice indiquait la catégorie probable de la cible, avec une probabilité de 75%. Ici, les participants devaient effectuer la tâche de discrimination de genre dans tous les essais, que la cible soit ciblée ou non. La moitié des blocs appartenait à la condition attention, et l'autre moitié à la condition attente. Les résultats élargissent la littérature dans ce domaine, en montrant des différences d'anticipation entre les conditions, indépendamment des exigences spécifiques liées au traitement des cibles. Les auteurs font l'hypothèse que l'attention pourrait biaiser la sensibilité neuronale anticipatoire en augmentant les différences perceptives entre les catégories pertinentes. Autrement dit, cette recherche amène à reconsidérer les modèles de prédiction sensorielle, avec différents modes d'anticipation spécifiques au contenu, adaptés au contexte de la tâche et impliquant différents niveaux de rétablissement perceptuel global.

Prédiction et attention ont également été manipulées dans des paradigmes omission-*oddball* en modalité auditive auprès de jeunes adultes pour déterminer la hiérarchie des réponses cérébrales (Wacongne et al., 2011). Les auteurs ont présenté des blocs de séquences auditives, localement déviantes (par exemple, XXXXY), localement standard (par exemple, XXXXX) ou dans lesquels la cinquième tonalité pouvait être omise (par exemple, XXXX_). Dans les blocs, soit la règle locale déviante, soit la règle locale standard était présentée 75% du temps, en tant que règle globale du paradigme, tandis que les autres blocs étaient présentés rarement. Les auteurs ont mis en évidence une MMN dans les blocs avec stimuli déviant, mais réduite dans la condition règle locale déviante, autrement dit lorsque ce stimulus déviant était prévisible. De plus, ils ont également démontré que les blocs localement standards peuvent également susciter une telle réponse neuronale lorsque les blocs déviants constituent la règle globale. Ces résultats suggèrent une hiérarchie dans les prédictions sensorielles, où en l'absence d'une erreur de prédiction de bas niveau, la violation de la prédiction de niveau supérieur peut susciter une erreur de prédiction et un signal de nouveauté.

Les liens entre prédiction sensorielle et attention dans le développement précoce de l'enfant demeurent spéculatifs et nécessitent davantage d'études. Étant donné l'importance de l'attention exécutive au cours du développement, l'émergence précoce de la prédiction dès les premiers mois de vie, et son effet synergique avec la prédiction à l'âge adulte, il est plausible que l'attention exécutive et la prédiction sensorielle se développent conjointement (Baek et al., 2020). Si tel est le cas, il est pertinent de considérer des liens entre dysfonctionnements exécutifs et déficits de prédiction sensorielle dans l'émergence de trajectoires développementales atypiques. Toutefois, nous n'avons encore que peu d'informations

concernant la prédiction sensorielle dans la modalité tactile si ce n'est chez les nouveau-nés et les nourrissons à risque.

4.3. Prédiction sensorielle dans la modalité tactile : un marqueur neurodéveloppemental de l'attention exécutive ?

Si des données émergent concernant la prédiction sensorielle dans la modalité tactile chez les nouveau-nés prématurés, la prédiction sensorielle tactile chez l'enfant n'est, à notre connaissance, pas encore caractérisée. Une étude menée auprès de 91 nourrissons âgés de 10 mois, à risques variés de neurodéveloppement atypique, a mis en évidence l'importance du traitement sensoriel tactile d'un point de vue neural et comportemental dans l'émergence de trajectoires développementales atypiques à l'âge de 2 ans (Piccardi et al., 2021). Les nourrissons à haut risque de TSA présentaient une réduction de la SR dans la modalité tactile. Cette moindre SR à 10 mois était associée de manière significative aux traits de TSA observés à 24 mois dans l'ensemble de l'échantillon.

Dumont et collaborateurs (2022) ont mis en évidence des capacités de prédiction sensorielle dans la modalité tactile chez des nouveau-nés prématurés nés entre 31 et 32 semaines, observés à 33 semaines d'AGc. Un mini-vibreux était placé sur le dessus de la main (main gauche ou droite en fonction des soins réalisés le jour de la mesure) et maintenu à l'aide d'un filet de coton. Les auteurs ont conçu deux séquences de stimulations vibrotactiles d'une durée totale de 13 minutes, l'une avec des intervalles inter-stimuli fixes et l'autre avec des intervalles inter-stimuli variables. Les participants (N=20) recevaient aléatoirement l'une des deux séquences. Des omissions au cours de la séquence ont été introduites afin d'évaluer l'activité du cortex somatosensoriel lorsqu'un stimulus était attendu mais non présenté. Les variations de flux sanguin cérébral dans le cortex somatosensoriel ont été enregistrées. Les résultats de cette étude ont mis en évidence une diminution de l'activité cérébrale durant les omissions lorsque l'intervalle inter-stimuli était fixe, résultant de la SR. En revanche, lorsque l'intervalle inter-stimuli était variable et donc les stimuli moins prévisibles, l'activité cérébrale lors des omissions était semblable aux activations cérébrales évoquées par les stimuli. Ces résultats sont les premiers à mettre en évidence une régulation de l'activité du cortex somatosensoriel par la prédiction sensorielle chez des nouveau-nés prématurés. Ils suggèrent la pertinence de la prédiction sensorielle tactile en tant que marqueur de risque de TND, en raison de sa possible implication dans le développement cognitif ultérieur.

Ainsi, nous suggérons qu'un traitement sensoriel atypique, en particulier dans la modalité tactile, *via* le mécanisme de prédiction sensorielle, puisse être précurseur d'un développement atypique de l'attention exécutive, au cœur de la symptomatologie des TND (Figure 21) (Anquetil et al., 2023). Plus précisément, nous supposons un lien entre prédiction sensorielle et attention exécutive par le mécanisme neural de SR qui faciliterait l'inhibition comportementale. La qualité des prédictions sensorielles affecterait également les fonctions exécutives, fonctions sous-tendues par l'attention exécutive, pour faciliter l'apprentissage neural et planifier de nouvelles stratégies pour réactualiser les modèles internes en fonction des erreurs de prédiction. Le sens du toucher, encore peu investigué dans la littérature en psychologie, en raison d'un manque de paradigmes expérimentaux adaptés et validés, est pourtant aux fondements du développement perceptif et cognitif. Un effet cascade pourrait ainsi s'opérer sur le neurodéveloppement de l'enfant si des atypies dans le traitement sensoriel tactile sont présentes dès le plus jeune âge sans intervention précoce. Une étude menée auprès d'enfants d'âge préscolaire nés prématurément semble le suggérer, avec une relation entre les symptômes sensoriels rapportés *via* le questionnaire du Profil Sensoriel de Dunn (Dunn et Brown, 1997) et les performances comportementales dans des tâches d'inhibition et de mémoire de travail, conjointement à un fonctionnement exécutif en situation de vie quotidienne altéré, mesuré par l'inventaire BRIEF-P (Adams et al., 2015).

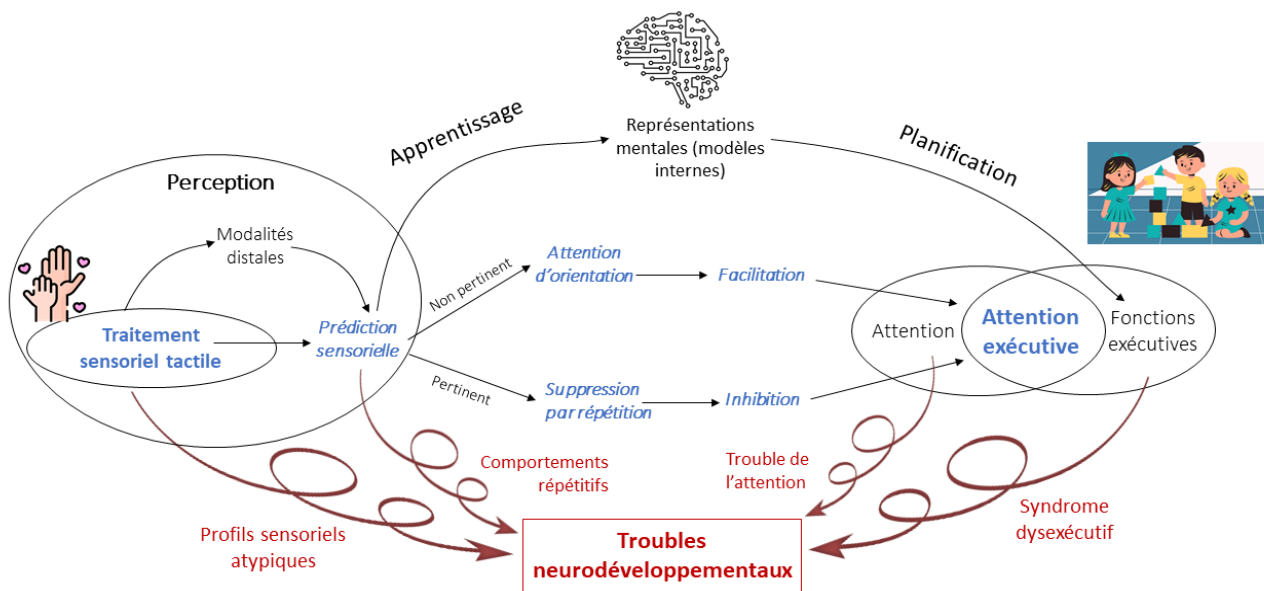


Figure 21. Synthèse de notre proposition théorique (Anquetil et al., 2023).

Par ailleurs, Weiss et collaborateurs (2018) ont montré chez des enfants âgés de 6 à 8 ans une relation entre l'activité anticipatrice dans la modalité tactile mesurée en EEG et les performances dans des tâches comportementales évaluant l'attention exécutive. Dans cette

étude, les auteurs ont conçu une tâche attentionnelle combinée à des stimuli tactiles diffusés sur le majeur de la main. À chaque stimulus tactile perçu, les enfants devaient appuyer sur une pédale avec leur pied. La séquence de stimuli visuel précédant le stimulus tactile comprenait une croix de fixation présentée pendant 500 ms, suivie de l'indicateur de flèche pendant 2250 ms, puis d'un écran de réponse affichant « Tapez avec votre pied » (Figure 22). À la suite de cette tâche, les enfants étaient invités à réaliser quatre tâches évaluant des fonctions associées à l'attention exécutive : une tâche de *flankers*, la tâche de tri de cartes DCCS, une tâche de vitesse de traitement de l'information ainsi qu'une tâche de vocabulaire d'images. Les auteurs ont mis en évidence que la capacité des enfants à anticiper un stimulus tactile représentait respectivement 20% de variance des scores à une tâche de *flankers* et 15% de variance à la tâche de tri de cartes (DCCS). Cette activité neuronale anticipatoire est restée significativement associée à l'attention exécutive en tenant compte d'autres covariables cognitives, à savoir le langage réceptif et la vitesse de traitement. Ces résultats soulignent l'importance de la modalité tactile dans le développement cognitif à l'âge scolaire.

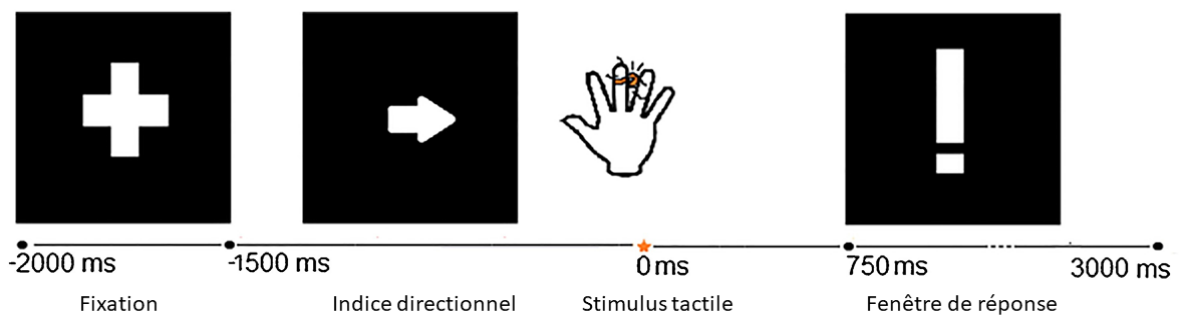


Figure 22. Protocole expérimental de la tâche attentionnelle tactile traduit à partir de Weiss *et al.* (2018).

L'étude des liens entre traitement sensoriel tactile et attention exécutive reste un domaine scientifique peu investi. À notre connaissance, seules ces deux études, conduites chez le nouveau-né prématuré et chez l'enfant d'âge scolaire, ont été publiées. Aucune étude cherchant à établir de tels liens n'a été menée chez des enfants d'âge préscolaire, alors que l'attention exécutive se développe considérablement durant cette période et est fortement sollicitée pour les premiers apprentissages scolaires (Rueda *et al.*, 2005). Nous suggérons que le mécanisme de prédiction sensorielle, en particulier dans la modalité tactile, puisse constituer un marqueur neurodéveloppemental de l'attention exécutive et permettre d'identifier très tôt des enfants à risque de trajectoire développementale atypique. Pour répondre à cette question de recherche, cela nécessite la mise en œuvre de paradigmes expérimentaux adaptés, d'une part, pour qualifier les capacités de prédiction sensorielle dans la modalité tactile et, d'autre part, pour évaluer l'attention exécutive.

Résumé du chapitre 3

L'approche neuroconstructiviste du développement cognitif, héritière contemporaine de l'approche piagétienne, fournit un cadre théorique pertinent pour témoigner de l'évolution des trajectoires développementales. Les contraintes développementales s'exercent à de multiples niveaux, et dès la vie fœtale par les expériences sensorielles précoces. Au sein du système somatosensoriel, la modalité tactile est la première à se développer. Elle constitue un socle fondamental au développement des autres modalités sensorielles. Des altérations et modifications précoces du traitement des informations tactiles peuvent compromettre la qualité du traitement sensoriel et tendre vers une trajectoire développementale atypique.

Le codage prédictif, basé sur l'hypothèse du cerveau bayésien, est une proposition théorique expliquant le lien entre les mécanismes perceptifs et le développement de l'attention. Par le mécanisme de prédiction sensorielle et celui, associé, de suppression par répétition, les réponses neuronales aux stimuli peuvent être renforcées ou atténuées en fonction de leur prévisibilité et de leur pertinence par rapport aux besoins du sujet. Cette capacité est mesurable chez des nouveau-nés et permet très tôt d'identifier des patterns atypiques de traitement de l'information sensorielle tactile, également identifiés dans la symptomatologie des TND. En revanche, les relations entre traitement sensoriel tactile et attention exécutive ne sont pas encore explorées chez les enfants d'âge préscolaire, période à laquelle celle-ci se développe considérablement.

Nous suggérons que des déficits de prédiction sensorielle dans la modalité tactile puissent constituer un marqueur neurodéveloppemental pertinent pour identifier précocement des enfants à risque de développement atypique de l'attention exécutive. Les contributions expérimentales de ce travail de thèse vont chercher à identifier des corrélats entre traitement de l'information sensorielle tactile et attention exécutive chez des enfants d'âge préscolaire.

Chapitre 4

Contributions expérimentales

*« On peut montrer que quelque chose existe, mais il est impossible de
montrer définitivement que quelque chose n'existe pas. »*

Gérald Bronner (2019)

Chapitre 4 - Contributions expérimentales

1. Problématique et objectifs

Au regard de l'ensemble des éléments théoriques présentés dans les chapitres précédents, il paraît pertinent d'explorer les liens entre l'attention exécutive et le traitement sensoriel tactile auprès d'une population d'enfants d'âge préscolaire présentant des trajectoires développementales à risques variés. Si de tels liens sont avérés, cela ouvrirait la voie vers de nouvelles perspectives de recherche mais également vers l'établissement de nouveaux outils de dépistage précoce des TND. Dans ce quatrième chapitre, nous allons présenter les contributions expérimentales de ce travail de thèse visant à répondre à cette problématique au travers de deux études exploratoires. Ces deux études, menées auprès de différents échantillons d'enfants avec des méthodes et hypothèses de recherche spécifiques, seront présentées successivement.

Dans la première étude, présentée en deux parties (étude 1A et 1B), nous avons étudié les liens entre l'attention exécutive et le traitement sensoriel tactile en situation de vie quotidienne, rapportés par les parents, au travers de deux hétéroévaluations (étude 1A), et nous avons évalué au sein du même échantillon la pertinence d'une nouvelle tâche d'attention exécutive adaptée à notre population et compatible avec des mesures en EEG, que nous avons nommée la *Preschool-ANT* (étude 1B). En raison de la Covid 19 le protocole a subi des remaniements importants concernant le recueil de données. Les premières inclusions prévues en mars 2020 dans des écoles maternelles n'ont pu avoir lieu en raison de la fermeture des établissements et ont été reportées en novembre 2020. La validation de la *Preschool-ANT* auprès d'un échantillon d'enfants suffisamment conséquent étant nécessaire avant de l'appliquer à nos hypothèses de recherche, nous avons en novembre également étendu les inclusions au sein de notre laboratoire de recherche.

Dans la seconde étude, nous avons quantifié d'une part l'activité neuronale évoquée par les différentes conditions d'un protocole *oddball*-omission dans la modalité tactile et d'autre part l'activité neuronale évoquée par les différentes conditions de la *Preschool-ANT*. L'objectif majeur était d'identifier des liens entre les potentiels évoqués liés à l'attention exécutive engagée dans la *Preschool-ANT* et les potentiels évoqués liés à la prédiction sensorielle engagée par le protocole tactile.

Ce travail de thèse s'inscrit dans une approche développementale. Cette perspective ne considère pas de façon binaire développements typique et atypique, mais plutôt l'expression de

différentes compétences sur un spectre continu de performances, pour chaque individu. Ces expressions comportementales évoluent de façon dynamique et interactive au cours du temps, aboutissant à des trajectoires développementales multiples. Notre travail vise à comprendre ces interactions entre différentes manifestations du développement, adressant ainsi les besoins de l'ensemble des enfants. Pour cela, nous avons choisi d'inclure les enfants quel que soit leur profil développemental dans un même échantillon expérimental et réaliser les analyses sur les variables continues pour prendre en compte la variabilité développementale. L'approche est également cross-syndromique, puisque le traitement sensoriel est envisagé comme marqueur précoce de la qualité du neurodéveloppement pour l'ensemble des trajectoires précoces, en amont de la différenciation syndromique.

2. Étude 1A - Attention exécutive et traitement sensoriel tactile en situation de vie quotidienne

2.1. Contexte et objectifs

Nous proposons qu'un traitement sensoriel atypique dans la modalité tactile puisse constituer un marqueur précoce de trajectoire développementale atypique, particulièrement concernant le développement de l'attention exécutive (Anquetil et al., 2023). Pour commencer d'explorer cette hypothèse de recherche, nous souhaitons dans un premier temps mettre en évidence d'un point de vue comportemental et écologique les relations entre l'attention exécutive et le traitement sensoriel tactile chez des enfants d'âge préscolaire, pour explorer ultérieurement les liens sur le plan de l'activité neuronale.

Nous souhaitons obtenir une variété de performances et un échantillon hétérogène afin d'avoir des variables continues avec une distribution suffisamment large. De ce fait, l'échantillon n'est ni représentatif de la population générale, ni dissocié en groupes d'enfants ayant une trajectoire développementale typique ou atypique. Nous avons étudié les réponses fournies par les parents dans deux évaluations contextualisées : d'une part l'attention exécutive par une mesure des fonctions exécutives, la BRIEF-P, et d'autre part le traitement sensoriel tactile mesuré par le questionnaire du Profil Sensoriel de Dunn (PSD). Nous avons émis l'hypothèse d'une corrélation négative entre les scores aux différentes échelles de la BRIEF-P et le score de traitement tactile du PSD, c'est dire que plus les scores à la BRIEF-P seraient élevés (davantage de difficultés), plus le score de traitement tactile serait faible (davantage de difficultés).

2.2. Méthode

Cette étude a fait l'objet d'une convention de partenariat avec la DSDEN du Calvados de mars 2020 à juin 2021 et a reçu un avis favorable du Comité de Protection des Personnes Ouest I le 26 janvier 2021 (2021T3-01 RIPH3 HPS 2020-A03209-30).

2.2.1. *Participants*

Pour être inclus dans l'étude, les enfants devaient être âgés de 4 à 5 ans 11 mois et être scolarisés en Moyenne ou Grande Section de maternelle ou en Cours Préparatoire en classe ordinaire ou en inclusion dans des classes ULIS²³. Les enfants étaient hébergés au sein de leur domicile familial. Pour participer, les parents ou tuteurs de l'autorité parentale devaient avoir donné leur consentement éclairé par écrit et les enfants devaient avoir donné leur consentement verbal après avoir reçu les explications de l'investigatrice. Tout enfant ne remplissant pas ces critères ne pouvait participer à l'étude. La prise de contact avec les parents a été effectuée par l'intermédiaire de brochures (Annexe 2) distribuées dans les écoles maternelles de l'Académie de Caen et établissements accueillant des enfants dans la tranche d'âge concernée tels que les centres sportifs, centres de loisirs et établissements médico-sociaux. Normandie Pédiatrie²⁴ a également diffusé ces brochures dans les courriers de suivi destinés aux enfants nés prématurément du réseau de Périnatalité de Normandie (suivi « Petit Deviendra Grand »). Dès que les parents acceptaient la participation de leur enfant et nous contactaient, un créneau adapté à l'enfant et aux disponibilités des parents et/ou de la structure d'accueil leur était proposé.

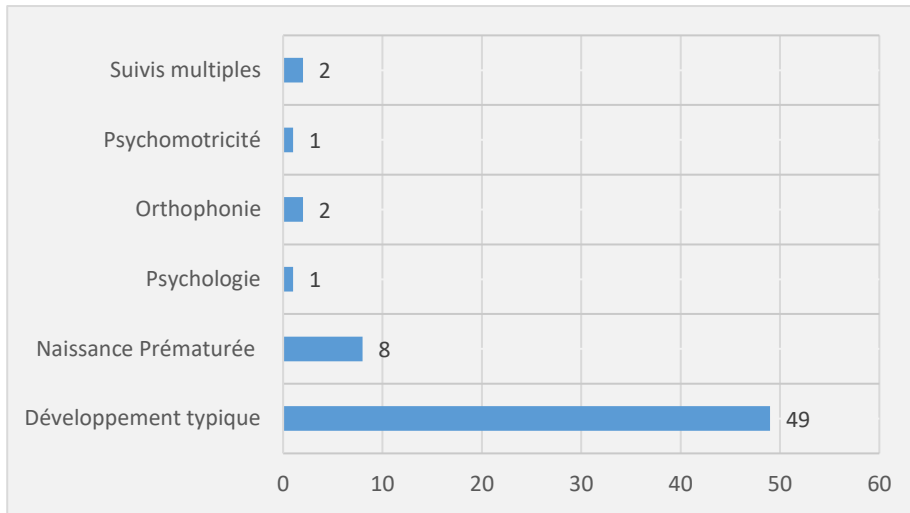
70 enfants ont été inclus dans l'étude 1, mais sept parents n'ont pas rendu les questionnaires au sein des écoles malgré plusieurs relances. Ainsi, l'échantillon final de l'étude 1A se compose de 63 enfants (âge moyen = 4 ans 11 mois ; écart-type \pm 6 mois ; 35 filles). Sur cet échantillon, 14 enfants présentaient des trajectoires développementales à risque (naissance prématurée et/ou suivi psycho-éducatif²⁵).

²³ Unités Localisées pour l'Inclusion Scolaire

²⁴ Normandie Pédiatrie est une association régionale accompagnant le parcours de santé d'enfants et adolescents présentant un TND en lien avec les différents professionnels du territoire. Plus d'infos : <https://www.normandie-pediatrie.org/>

²⁵ Au sein des profils avec suivi psycho-éducatif, nous comprenons les prises en charge par un psychologue, un orthophoniste, un psychomotricien ou bien des suivis multiples.

Tableau 2. Caractéristiques développementales des 63 enfants inclus dans l'étude.



2.2.2. Protocole expérimental

Les parents d'enfants issus de trois écoles maternelles de l'Académie de Caen, d'une école maternelle privée de la Manche et ceux qui se sont rendus dans les locaux du laboratoire COMETE de l'Université de Caen situé au Pôle des Formations et de Recherche en Santé ont été invités à compléter deux questionnaires : la BRIEF-P, inventaire d'évaluation des fonctions exécutives version préscolaire, et le questionnaire du PSD.

La complétion des questionnaires était incluse dans un protocole d'acquisitions comportementales qui sera décrit dans l'étude 1B. Dans les établissements scolaires, les parents remettaient les questionnaires dans le cahier de liaison de l'enfant avec le formulaire de consentement signé. Les parents qui se sont déplacés au laboratoire ont complété les questionnaires durant l'évaluation comportementale proposée à leur enfant. Tous les parents ont également complété un questionnaire d'inclusion permettant de recueillir des informations relatives à la naissance de leur enfant, leur sexe, le type de scolarité, et un éventuel suivi psycho-éducatif qui témoignerait de difficultés de développement. Ils pouvaient également laisser un commentaire libre s'ils en exprimaient la nécessité. Ce commentaire visait à nous permettre d'identifier, le cas échéant, une orientation vers une structure spécialisée.

Tous les enfants ont reçu un « diplôme » à l'issue de leur participation.

2.2.2.1. *Inventaire d'évaluation des fonctions exécutives destiné aux enfants d'âge préscolaire*

La BRIEF-P (*Behavior Rating Inventory of Executive Function – Preschool version*) est un inventaire d'évaluation des fonctions exécutives chez l'enfant d'âge préscolaire âgé de 2 à 5 ans 11 mois (Gioia et al., 2003). Cet outil a été validé et adapté en version française par A. Roy et D. le Gall et édité par les éditions Hogrefe en 2014. Il permet d'évaluer le fonctionnement exécutif en contexte écologique rapporté par les parents, l'enseignant ou une personne familière de l'enfant (Annexe 3). L'attention exécutive étant mise en œuvre au sein de l'ensemble des fonctions exécutives, l'utilisation de la BRIEF-P nous semble pertinente pour commencer d'explorer les liens avec le traitement tactile dans la vie quotidienne. Le parent ou une personne titulaire de l'autorité parentale, a répondu au questionnaire version parent.

Le temps de passation est estimé entre 10 et 15 minutes. Le répondant a pour consigne de répertorier des comportements observés chez l'enfant au cours des six derniers mois. Ainsi, il est demandé pour chaque phrase énoncée de penser au comportement de l'enfant et à la qualification problématique ou non de ce comportement. Le répondant doit entourer la lettre J (JAMAIS) si le comportement n'est jamais un problème, la lettre P (PARFOIS) si c'est parfois un problème et la lettre S (SOUVENT) si ce comportement est souvent un problème. La saisie des résultats et le calcul des scores se fait sur une plateforme dédiée qui permet une saisie rapide des résultats et une analyse des notes brutes et notes standards.

Les 63 questions de la BRIEF-P sont réparties sur cinq échelles cliniques distinctes : inhibition, flexibilité, contrôle émotionnel, mémoire de travail et planification. Elles permettent d'obtenir un aperçu des points forts et points faibles concernant le fonctionnement exécutif de l'enfant. Ces échelles cliniques forment ensemble trois grands indices : l'indice de contrôle inhibiteur (inhibition et contrôle émotionnel), l'indice de flexibilité (flexibilité et contrôle émotionnel) et l'indice de métacognition émergente (mémoire de travail, planification). Le score composite exécutif global résume les cinq échelles cliniques de la BRIEF-P.

Deux échelles complémentaires permettent d'évaluer la validité de l'échelle. L'échelle d'incohérence indique dans quelle mesure la personne qui a répondu au questionnaire donne des réponses cohérentes par rapport à l'ensemble des échantillons normatifs. L'échelle de négativité évalue la tendance du répondant à donner des réponses aux items de manière inhabituellement négative. Ces deux indicateurs peuvent remettre en cause la validité de l'échelle si aucune explication clinique ne justifie les différences entre les paires d'items dans les deux échelles. Ces critères ont été inspectés et pris en compte dans l'analyse des réponses

fournies par les parents dans les questionnaires. Si un questionnaire comportait trop de réponses incohérentes, il n'était pas pris en compte dans l'analyse des résultats. Si un questionnaire comportait trop de réponses négatives, elles étaient mises en relation avec le profil de l'enfant rapporté dans le questionnaire d'inclusion, pour déterminer si ces réponses rapportaient véritablement des comportements problématiques au quotidien.

2.2.2.2. *Profil Sensoriel de Dunn*

Le PSD, adapté dans une version française par les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée (ECPA), est un questionnaire qui évalue les capacités d'intégration sensorielle ainsi que l'impact de la sensorialité sur le fonctionnement de l'enfant dans sa vie quotidienne (Dunn et Brown, 1997a). Son but est de décrire le plus précisément possible les comportements de l'enfant dans diverses situations sensorielles de la vie quotidienne. Il doit être rempli par un adulte connaissant bien l'enfant, le parent ou la personne s'occupant le plus souvent de lui, puisqu'il nécessite une bonne observation de l'enfant et de ses comportements et réactions. Il permet d'évaluer les enfants âgés de 3 à 10 ans 11 mois, et il est adapté à tous types de populations : enfants au développement typique, enfants porteurs de handicap, de troubles neurodéveloppementaux ou de pathologie neurologique (Annexe 4).

Le répondant doit définir la fréquence à laquelle apparaissent différents comportements en choisissant entre cinq réponses : toujours, fréquemment, parfois, rarement, jamais. Les 125 items sont répartis dans 14 sections regroupées dans trois grands thèmes (Figure 23). Le premier thème, le traitement de l'information sensorielle, permet d'évaluer chacune des modalités sensorielles (auditive, visuelle, vestibulaire, tactile, orale, multisensorielle) afin d'en évaluer les réactions de l'enfant allant de l'hyporéaction à l'hypperréaction. Le deuxième thème, la modulation, permet d'évaluer la capacité de l'enfant à contrôler et réguler les informations sensorielles qu'il reçoit et d'ajuster ses comportements en fonction de ces informations. Il comprend 5 sections : traitement de l'information sensorielle liée à l'endurance/au tonus, modulation liée à la position du corps et au mouvement, modulation du mouvement affectant le niveau d'activité, modulation de l'enregistrement de l'entrée sensorielle affectant les réponses émotionnelles, et modulation de l'enregistrement de l'entrée visuelle affectant les réponses émotionnelles et le niveau d'activité. Le dernier thème vise à évaluer si l'enfant réussit

à ajuster ses réponses émotionnelles et comportementales aux situations dans lesquelles il se trouve.

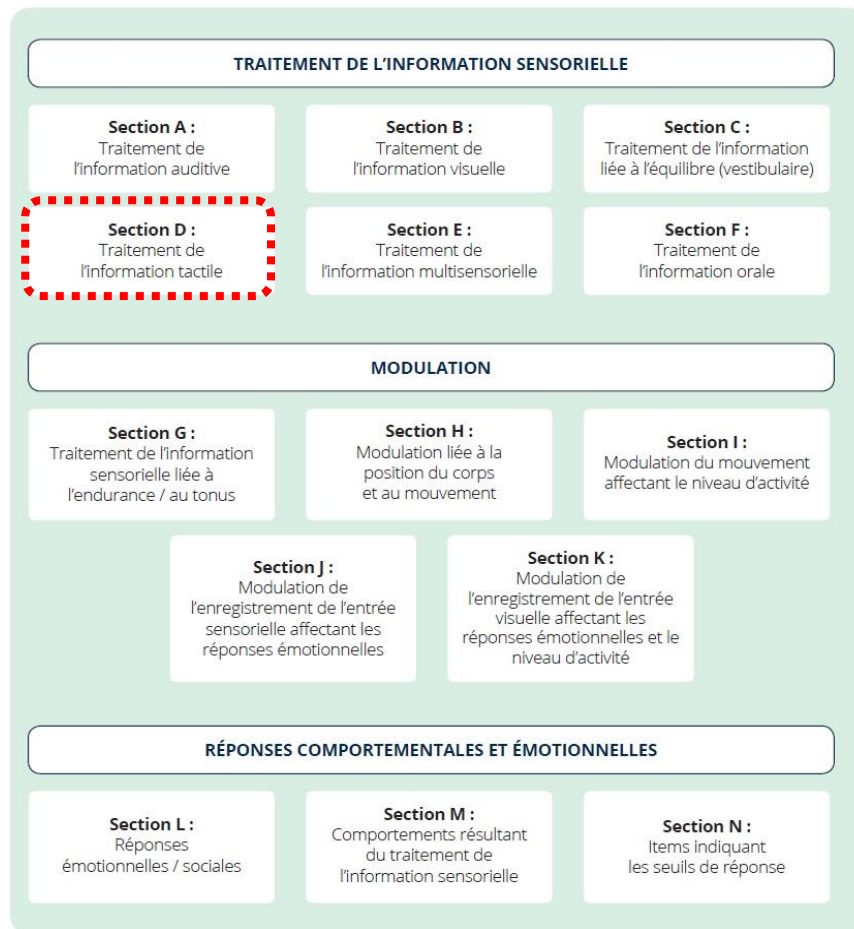


Figure 23. Répartition des items du Profil Sensoriel de Dunn dans les 14 sections et les 3 thèmes (ECPA, Pearson).

Les items du questionnaire sont repartis en neuf facteurs qui permettent de créer le profil sensoriel de l'enfant : recherche de sensations, réactivité émotionnelle, endurance/tonus faibles, sensibilité sensorielle orale, inattention/distractibilité, hypo-réactivité sensorielle, sensibilité sensorielle, sédentarité, motricité fine/perception. L'analyse des différents facteurs et des différentes sections permet de repérer des particularités dans le traitement de l'information sensorielle.

Pour notre étude, nous avons utilisé les réponses fournies par les parents concernant le traitement de l'information sensorielle au sein de la section D, associée au traitement sensoriel tactile. Les autres sections, associées à d'autres modalités sensorielles, n'ont pas été exploitées.

2.3. Résultats

Les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant le logiciel Jamovi (*The Jamovi Project*, version 1.6.21, 2021) et en prenant un seuil de risque $\alpha < 0,05$ pour l'ensemble des tests effectués. La normalité des distributions a été testée avec le test de Shapiro-Wilk pour l'ensemble des données.

Le Tableau 3 présente les résultats obtenus aux deux questionnaires. Plus le score obtenu à la BRIEF-P est élevé, plus l'enfant présente des difficultés. Le seuil considéré comme cliniquement anormal est fixé à 65 pour toutes les échelles. Neuf enfants ont obtenu un score composite exécutif global supérieur ou égal à ce seuil. Plus le score obtenu dans une section du questionnaire du PSD est bas, plus l'enfant présente des particularités sensorielles. L'interprétation clinique des scores de la section liée au traitement tactile se distingue en trois classifications de performances : une performance typique entre 90 et 71, une différence probable entre 70 et 59 et une différence avérée entre 58 et 18. Deux enfants présentaient une différence avérée.

Tableau 3. Résultats obtenus aux hétéro-questionnaires (BRIEF-P et PSD).

| | Moyenne + Écart-type | Médiane | 1 ^{er} quartile | 3 ^e quartile | Intervalle inter- quartile | Minimum | Maximum |
|---|-------------------------|---------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------|---------|
| BRIEF-P | | | | | | | |
| Score composite exécutif global | 51,5 (12,8) | 48 | 41,8 | 57 | 15,2 | 32 | 85 |
| <i>Inhibition</i> | 50,8 (11,1) | 51 | 43 | 56 | 13 | 32 | 79 |
| <i>Flexibilité</i> | 51,1 (11,5) | 50 | 43 | 53,3 | 10,3 | 36 | 95 |
| <i>Mémoire de Travail</i> | 50,7 (12,5) | 46 | 41 | 58 | 17 | 36 | 85 |
| <i>Planification</i> | 51,6 (12,6) | 47 | 42,8 | 57 | 14,2 | 35 | 78 |
| <i>Contrôle émotionnel</i> | 52,8 (12,3) | 51 | 43,8 | 56,5 | 12,7 | 37 | 88 |
| Profil Sensoriel de Dunn | | | | | | | |
| Score de traitement sensoriel tactile (/90) | 78 (8,94) | 80 | 73,5 | 85 | 11,5 | 53 | 90 |

Les réponses rapportées par les parents au questionnaire BRIEF-P ne suivaient pas une loi normale, que ce soit pour le score composite exécutif global ($W = 0,925$; $p < 0,001$) ou pour toutes les autres échelles (*Inhibition* / $W = 0,949$; $p < 0,001$; *Flexibilité* / $W = 0,815$; $p < 0,001$; *Mémoire de Travail* / $W = 0,883$; $p < 0,001$; *Planification* / $W = 0,899$; $p < 0,001$; *Contrôle émotionnel* / $W = 0,908$; $p < 0,001$). Il en était de même pour le score de traitement tactile du PSD ($W = 0,909$; $p < 0,001$).

Bien que la BRIEF-P ait été soumise à une validation auprès d'une population générale d'enfants d'âge préscolaire, nous avons dans notre échantillon près de 22% de profils atypiques, ce qui est plus élevé que dans la population générale et peut expliquer la distribution de nos données. Par ailleurs, une distribution semblable est rapportée avec la BRIEF-P dans une étude menée au sein d'une population d'enfants d'âge préscolaire nés prématurément (Reynold de Seresin et al., 2023).

Nous rapportons également une corrélation positive entre les différents indices de la BRIEF-P, résultats cohérents avec la validité de construit de l'outil rapportée dans différents contextes de vulnérabilité (Roy et Le Gall, 2018).

Les distributions de nos différents scores ne suivant pas une loi normale, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Spearman. Les résultats mettent en évidence une corrélation négative entre le score composite exécutif global obtenu à la BRIEF-P et le score de traitement tactile au PSD ($\rho = -0,456$; $p < 0,001$; Figure 24).

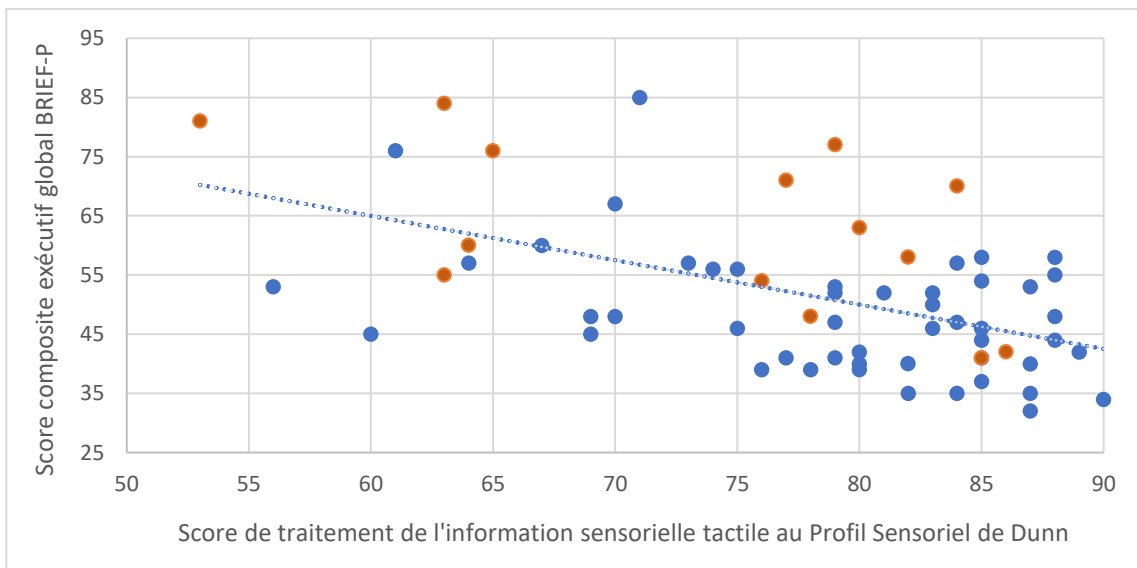


Figure 24. Relation entre le score composite exécutif global BRIEF-P et le score de traitement de l'information sensorielle tactile au Profil Sensoriel de Dunn. Les profils d'enfants présentant des trajectoires développementales à risque sont identifiés en orange.

Cette relation négative avec le traitement tactile au PSD est également mise en évidence pour chaque indice de la BRIEF-P : l'inhibition ($\rho = -0,453$; $p < 0,001$), la flexibilité ($\rho = -0,291$; $p = 0,021$), la mémoire de travail ($\rho = -0,384$; $p = 0,002$), la planification ($\rho = -0,379$; $p = 0,002$) et le contrôle émotionnel ($\rho = -0,369$; $p = 0,003$).

L'ensemble des coefficients de corrélation est rapporté dans le Tableau 4.

Tableau 4. Tableau récapitulatif des corrélations entre les hétéro-questionnaires : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules surlignées en jaune correspondent aux hypothèses de l'étude.

| | | BRIEF-P | | | | | | |
|-------------|---------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| | | Tactile PSD | GEC | Inhibition | Flexibilité | MDT | Planification | Contrôle émotionnel |
| Tactile PSD | | - | <0,001 | <0,001 | 0,021 | 0,002 | 0,002 | 0,003 |
| BRIEF-P | GEC | -0,456 | - | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| | Inhibition | -0,453 | 0,856 | - | 0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| | Flexibilité | -0,291 | 0,660 | 0,401 | - | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| | MDT | -0,384 | 0,876 | 0,711 | 0,463 | - | <0,001 | <0,001 |
| | Planification | -0,379 | 0,875 | 0,654 | 0,603 | 0,774 | - | <0,001 |
| | Contrôle émotionnel | -0,369 | 0,742 | 0,539 | 0,544 | 0,554 | 0,590 | - |

Note : PS = Profil Sensoriel ; GEC = Score Composite Exécutif global à la BRIEF-P ; MDT = Mémoire de travail

2.4. Discussion

Nous avons mis en évidence que, chez des enfants présentant une variété de profils de développement, âgés de 4 à 5 ans 11 mois, plus le score composite exécutif obtenu à la BRIEF-P est fort, plus le score de traitement sensoriel tactile au PSD est faible. Autrement dit, en situation de vie quotidienne, plus les parents rapportent des fonctions exécutives efficaces, plus ils rapportent un traitement tactile efficace. Cette relation avec le traitement tactile persiste pour chacune des différentes échelles de la BRIEF-P : inhibition, flexibilité, mémoire de travail, planification et contrôle émotionnel.

Peu de travaux ont exploré les liens entre l'attention exécutive, les fonctions exécutives et le traitement sensoriel, en particulier dans la modalité tactile. Dans une étude menée auprès d'enfants âgés de 3 à 5 ans nés à terme et nés prématurément, Adams et collaborateurs (2015) ont mis en évidence un lien entre le score composite exécutif global obtenu à la BRIEF-P et le score obtenu à la version abrégée du PSD. De façon attendue, les enfants nés prématurés présentaient des dysfonctionnements exécutifs plus élevés et des symptômes sensoriels plus fréquents que leurs pairs nés à terme. En revanche, dans cette étude les auteurs ne mettaient pas en évidence de lien entre le traitement tactile et le score composite exécutif global (ni aucune autre échelle de la BRIEF-P). Le nombre d'items relatifs au traitement tactile est cependant limité à sept dans cette version abrégée, au lieu de 18 dans la version complète que nous utilisons. Il est possible que cela diminue la sensibilité. Brown et collaborateurs (2021), rapportent quant à eux, auprès d'enfants âgés de 6 à 10 ans, le score de traitement sensoriel

tactile obtenu au Profil Sensoriel 2 était prédictif du score composite exécutif rapporté à la BRIEF-2. Les auteurs rapportent une corrélation positive, résultat différent du nôtre, mais semblable dans son interprétation. Le Profil Sensoriel 2 se divise en trois questionnaires différents (jeune enfant, enfant, scolaire) et propose une révision de l'ensemble des énoncés en réactualisant certains items devenus culturellement obsolètes et en augmentant la lisibilité et l'utilité clinique de l'outil. Ainsi, les auteurs suggèrent également des liens entre symptômes attentionnels et symptômes sensoriels, en particulier tactiles, rapportés en situation de vie quotidienne.

Nous pouvons interroger la nature de la relation mise en évidence en raison même des outils de mesure employés dans notre étude, des hétéro-questionnaires. Ces résultats mettent-ils en évidence une part de variance commune entre les réponses parentales fournies dans les deux questionnaires, du fait de biais de style parental ou de sensibilité parentale par exemple ? Nous ne pouvons pas exclure que les représentations parentales aient pu accentuer la corrélation entre les réponses fournies aux deux hétéro-questionnaires. Cependant, les études montrent que les parents sont généralement les premiers à repérer des manifestations comportementales atypiques dans les signes précoces des TND (Zwaigenbaum et al., 2013), de sorte que leurs observations sont pertinentes malgré de possibles biais.

Que ce soit par une hypoactivité ou une hyperréactivité aux stimuli tactiles, lorsque les seuils de traitement de l'information sensorielle sont mal régulés, cela peut conduire à des manifestations comportementales visant à réduire ou augmenter les entrées sensorielles pour les adapter à ce seuil. Ces comportements sont adaptatifs à court terme mais peuvent interférer avec la mise en œuvre de stratégies de contrôle exécutif indispensables à long terme. Ces interférences pourraient trouver leur origine dans un dysfonctionnement du réseau de la saillance, considéré comme un précurseur du réseau exécutif. L'allocation des ressources attentionnelles au traitement de stimuli saillants nécessite un contrôle descendant (*top-down*) de la sensibilité et un contrôle ascendant (*bottom-up*) du filtrage des stimuli (Parr et Friston, 2017). De telles hypothèses sont formulées dans une récente revue de littérature portant sur le rôle du réseau de la saillance en lien avec des déficits cognitifs (Schimmelpfennig et al., 2023). Le réseau de la saillance, assure une bonne régulation entre le réseau de mode par défaut et le réseau exécutif. En cas de dysfonctionnement, les connexions entre les différents réseaux sont mal régulées et favoriseraient l'émergence de troubles spécifiques en fonction de la connexion spécifiquement affectée.

Les résultats de cette première partie d'étude soutiennent l'idée d'une base développementale commune entre les capacités d'attention exécutive et le traitement sensoriel tactile chez des enfants d'âge préscolaire. Si nous mettons en évidence de tels liens en situation de vie quotidienne, ces liens peuvent également se retrouver dans d'autres situations contextualisées, notamment le contexte scolaire, ou au contraire être spécifiques de l'écosystème familial. Afin de déterminer la consistance des liens entre attention exécutive et traitement tactile en dehors de ce contexte, nous en proposons la mesure au travers de tâches de performance conjointement à la quantification des mécanismes neuronaux sous-jacents. Dans ce but, la seconde partie de cette étude vise à évaluer la pertinence d'une mesure informatisée de l'attention exécutive adaptée à notre population préscolaire, et qui serait compatible avec des mesures en EEG.

3. Étude 1B - Conception d'une tâche pour l'évaluation de l'attention exécutive chez l'enfant d'âge préscolaire

3.1. Contexte et objectifs

L'*Attention Network Task (ANT)* est une tâche informatisée conçue pour évaluer, chez l'adulte, l'efficacité des réseaux attentionnels tels que modélisés par Posner (Fan et al., 2002). Cette tâche a ensuite été adaptée pour l'enfant d'âge scolaire, la *Child-ANT* (Rueda, Fan, et al., 2004b). Dans cette tâche, le sujet doit repérer la direction d'un stimulus central entouré de *flankers* présentés en condition congruente, incongruente ou neutre. Les stimuli présentés à l'écran sont des flèches pour les adultes, des poissons (ornés de la flèche originale) pour les enfants, précédés d'indices visuels qui peuvent faciliter l'orientation de l'attention ou au contraire nécessiter une réorientation de celle-ci. Des indices précèdent l'apparition du stimulus cible selon différentes configurations : pas d'indice, indice neutre, double indice, et indice spatial. L'indice spatial fournit une information valide sur l'apparition ultérieure du stimulus cible à traiter. Les sujets doivent fournir une réponse motrice le plus rapidement possible. Pour les enfants, la consigne donnée par l'expérimentateur est de nourrir un maximum de poissons le plus vite possible en appuyant sur le bouton indiquant sa direction. Dans l'étude de Rueda, Fan et al. (2004) les auteurs ont montré une diminution globale des temps de réaction et du taux d'erreurs entre l'âge de 6 et 10 ans dans les conditions congruente et incongruente, et des performances semblables à celles d'adultes à partir de 7 ans. L'effet de conflit, calculé comme la différence des temps de réaction entre les conditions congruente et incongruente, diminue également avec l'âge.

L'objectif de notre étude était d'adapter la *Child-ANT* à l'enfant d'âge préscolaire en vue d'une utilisation ultérieure pour quantifier l'activité neuronale liée à l'engagement de l'attention exécutive telle que décrite dans la littérature. L'adaptation de certains paramètres devait à la fois maintenir certains paramètres inhérents à la tâche, tout en proposant une version ludique et adaptée à l'âge. Afin de respecter le temps de réaction généralement plus long chez des enfants plus jeunes, nous avons allongé le temps de réaction. Nous avons également simplifié certains paramètres, en simplifiant le nombre de stimuli visuels présentés à l'écran et en variant les animaux entre chaque bloc, pour rendre la tâche moins monotone comparée à la *Child-ANT*.

Nous avons comparé les performances obtenues dans cette nouvelle tâche nommée la *Preschool-ANT* aux performances observées dans les tâches HTKS et Stroop, qui évaluent la composante d'inhibition, postulant comme discuté dans le Chapitre 1 qu'une part importante de la variance des fonctions exécutives est imputable à la variance de l'attention exécutive.

Nous avons émis plusieurs hypothèses concernant les performances comportementales en lien avec la littérature. Pour la *Preschool-ANT*, nous nous attendions à des temps de réaction plus élevés dans les conditions incongruentes que dans les conditions congruentes. Concernant la relation entre les performances à la *Preschool-ANT* et les performances dans les tâches de contrôle inhibiteur, nous formulons l'hypothèse que plus les enfants auraient des temps de réaction élevés en condition incongruente à la *Preschool-ANT*, plus le score obtenu à l'HTKS serait faible, et plus les temps de complétion seraient élevés en condition incongruente au Stroop. Nous formulons également l'hypothèse que plus les enfants commettraient d'erreurs en condition incongruente à la *Preschool-ANT*, plus ils commettraient d'erreurs en condition incongruente au Stroop. Nous supposons également que plus les enfants commettraient d'erreurs en condition incongruente à la *Preschool-ANT*, plus leur score à l'HTKS partie 1 serait faible.

3.2. Méthode

3.2.1. Participants

Les participants sont tous ceux inclus dans l'étude 1 (N = 70 ; âge moyen = 4 ans 11 mois ; écart-type \pm 6 mois ; 38 filles ; 16 présentant un risque accru de troubles). Ils ont réalisé les trois tâches proposées, sauf pour l'HTKS, composée de deux parties : sur les 70 enfants seulement 46 ont obtenu un score à la partie 1 suffisant pour passer la partie 2, plus complexe.

Ainsi, nos analyses statistiques portent seulement sur les performances obtenues dans la partie 1 de l'HTKS.

3.2.2. *Protocole expérimental*

Les passations se sont déroulées dans les établissements scolaires ainsi qu'au laboratoire de recherche. Concernant les acquisitions en établissements scolaires, nous avons rencontré les enfants individuellement sur le temps de classe après avoir obtenu le consentement des parents pour que leur enfant participe à l'étude. Concernant les acquisitions au laboratoire, les parents ont été invités à venir avec leur enfant dans les locaux du laboratoire après avoir pris connaissance des documents d'information et de consentement pour participer à l'étude. Un formulaire de droit à l'image leur était également remis pour nous permettre, le cas échéant, l'utilisation d'images et vidéos prises durant les passations. Chaque passation a duré environ 1h30 à 2h. Les enfants ont réalisé dans un ordre randomisé les tâches suivantes : la *Preschool-ANT*, l'HTKS et la tâche de Stroop.

3.2.2.1. *Tâche d'attention exécutive adaptée aux enfants d'âge préscolaire*

La tâche a été conçue sur *E-Prime*® 2 (Psychology Software Tools Inc., Pittsburgh, PA, USA) *via* le module *E-Studio*. Nous collectons l'exactitude des réponses fournies mais également le temps de réaction dans les différentes conditions de la tâche en fonction des blocs expérimentaux.

Les stimuli cible étaient présentés soit orientés vers la gauche, soit orientés vers la droite, en bas de l'écran ou en haut de l'écran. En condition congruente, les *flankers* sont orientés dans la même direction que la cible, en condition incongruente ils sont orientés dans la direction opposée (Figure 25). Les indices précédant l'apparition du stimulus cible étaient des indices spatiaux, selon deux conditions : indice valide et indice non valide. Ainsi, soit l'indice était présenté au même endroit que l'apparition du stimulus cible (au-dessus ou au-dessous de la croix de fixation), soit il était présenté à l'endroit opposé par rapport à la croix de fixation. Les essais étaient répartis en trois blocs expérimentaux successifs dont l'animal était dans un premier temps des poissons, formant le bloc « poissons », puis un bloc « cochons » et enfin un bloc « tortues ». Les animaux étaient facilement indentifiables (nous demandions à chaque

enfant de les nommer en début de tâche pour nous en assurer) et marqués d'une flèche du sens du stimulus identique à celle de la *flanker task* originale.

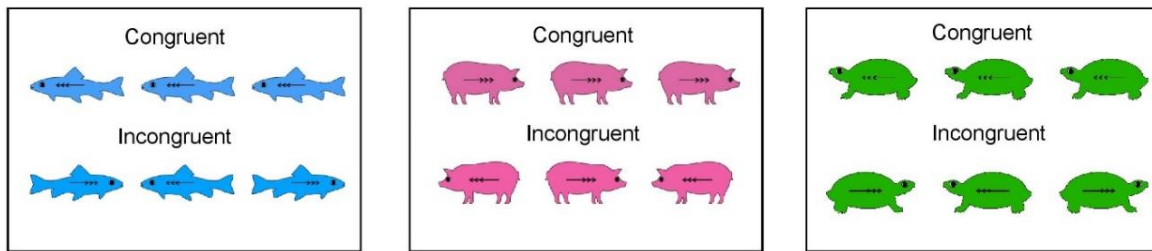


Figure 25. Stimuli animaux présentés dans les blocs expérimentaux de la *Preschool-ANT*.

Une session consistait en un total de 30 essais d'entraînements et de trois blocs expérimentaux de 36 essais chacun. Chaque essai représentait une des différentes conditions en proportions égales : deux types de stimuli cible (congruents, incongruents) x deux indices spatiaux (valides, invalides) x deux localisations de la cible (haut de l'écran, bas de l'écran) x deux sens des cibles (gauche, droite). Chaque présentation de stimulus était précédée d'une croix de fixation pendant 400ms, suivie d'un indice valide ou non valide présenté pendant 250ms, puis d'une autre croix de fixation pendant 400ms. Le stimulus cible était ensuite présenté pendant 3000ms en condition congruente ou incongruente. Un *feedback* visuel (l'animal sourit) et auditif (bruit de bulle pour le poisson, grognement pour le cochon, couinement pour la tortue) ; d'une durée de 250ms était présenté si l'enfant donnait une bonne réponse. Aucun *feedback* n'était donné si l'enfant ne répondait pas assez vite ou s'il commettait une erreur (Figure 26).

Les instructions données étaient les suivantes : « Tu vas participer au jeu des animaux. Ta mission est de nourrir l'animal au centre de l'écran. Tu dois repérer dans quel sens se déplace l'animal au centre, vers la gauche ou vers la droite. Pour lui donner à manger, tu dois appuyer sur la flèche de droite ou de gauche du clavier. Si l'animal situé au centre va vers la droite, appuie sur la touche de droite. Si l'animal situé au centre va vers la gauche, appuie sur la touche de gauche. Si tu te trompes, ce n'est pas grave, poursuis le jeu. Tu dois nourrir un maximum d'animaux, le plus vite possible ! Nous allons commencer par un entraînement pour voir si tu as bien compris. Tu es prêt ? ». Le temps total de passation est estimé entre 15 et 20 minutes, entraînement compris.

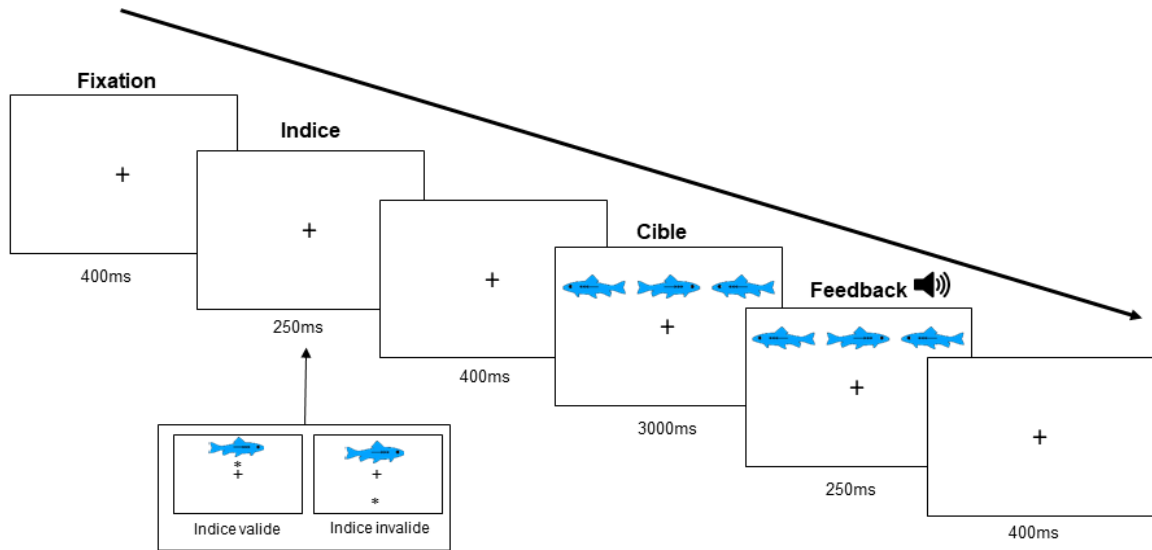


Figure 26. Protocole expérimental de la *Preschool-ANT*.

La session d'entraînement débutait par une présentation de stimuli en condition neutre, où chaque animal était présenté seul, puis on introduisait la présentation de trois animaux au fur et à mesure de l'entraînement. Pendant cette phase, l'expérimentateur restait avec l'enfant, l'encourageait et lui montrait sur l'écran les réponses et le sens des stimuli pour le mettre en confiance. L'entraînement pouvait être répété jusqu'à trois fois si nécessaire. Si au bout de trois entraînements, sans progression significative de l'enfant et/ou si l'enfant n'a toujours pas saisi le but de la tâche, il lui était proposé de poursuivre le jeu ou d'arrêter. Si l'enfant décidait de poursuivre, les données n'étaient pas exploitables car les réponses fournies étaient le fruit du hasard. Pour les blocs expérimentaux, l'expérimentateur n'intervenait pas et laissait l'enfant réaliser chaque bloc seul. Il proposait une pause à l'enfant à la fin de chaque bloc si cela était nécessaire ou si l'enfant exprimait le souhait d'interrompre le jeu.

Cette tâche a permis de recueillir les temps de réaction et le nombre d'erreurs dans chaque condition pour chaque bloc. Les réponses impulsives commises par les enfants, c'est-à-dire une réponse donnée en moins de 300ms, ont été retirées des données à analyser. Le score de conflit a été calculé comme la différence entre le temps de réaction médian en condition incongruente et le temps de réaction médian en condition congruente.

3.2.2.2. Évaluation du contrôle inhibiteur en situation d'action motrice

L'HTKS évalue l'autorégulation comportementale, notamment le contrôle inhibiteur en situation motrice (McClelland et al., 2014; Ponitz et al., 2009). Cette épreuve demande aux enfants âgés de 4 à 8 ans de se souvenir d'une consigne et de l'appliquer à une action motrice

(Figure 27). Après entraînement, la consigne est inversée en phase de test pour devenir en conflit avec l'action motrice demandée (l'enfant doit par exemple toucher sa tête lorsque l'examineur lui dit de toucher ses pieds, et inversement). La version utilisée dans cette étude a été validée en français dans le cadre d'une thèse de doctorat (Hubert, 2015; Hubert et al., 2015). La tâche est divisée en deux parties pour des enfants d'âge préscolaire : la partie 1, forme la plus simple avec deux parties du corps, et la partie B, comprenant cette fois-ci quatre parties du corps (Annexe 5). L'examineur doit toujours commencer par la partie 1 et passe à la partie suivante si l'enfant a répondu correctement à 5 items ou plus de la partie 1 et s'il est en Grande Section de maternelle. L'utilisation de cet outil n'ayant pas une finalité clinique, nous avons proposé la partie 1 et 2 à tous les enfants, à la seule condition qu'ils aient rempli le critère de réussite de la forme 1.



Figure 27. Illustration de la passation de la tâche HTKS.

Des conditions spécifiques sont requises pour la passation. L'examineur doit être seul avec l'enfant dans un environnement isolé et dispose d'instructions spécifiques qui ne doivent pas être lues à l'enfant. L'ensemble de la passation est présenté comme un jeu. L'enfant doit rester face à nous à une distance d'environ à « 3 pieds ». La tâche peut se faire assis ou debout. L'ensemble des parties correspond à 30 items notés chacun de 0 à 2. L'examineur notera 0 si l'enfant touche la mauvaise partie du corps et ne s'auto-corrige pas. Si l'enfant touche d'abord la mauvaise partie de son corps, ou s'y apprête, mais s'auto-corrige, l'examineur notera 1. Si l'enfant produit la bonne réponse, l'expérimentateur notera un score de 2 pour l'item concerné.

Dans la première partie de l'HTKS, l'examineur introduit les consignes à l'enfant et vérifie l'exécution de commandes motrices simples. L'enfant, accompagné de l'examineur, est invité à mettre les mains sur sa tête, puis sur ses pieds. L'examineur peut fournir à l'enfant des *feedbacks* et l'encourager à poursuivre la tâche. Ensuite, l'examineur passe à la partie pratique où il introduit la consigne contradictoire : « Quand je te dis de toucher ta tête, au lieu

de toucher ta tête, tu touches tes pieds ». Si l'enfant répond correctement, un *feedback* positif est fourni. Si l'enfant se trompe, l'examineur peut donner jusqu'à trois explications supplémentaires avant le début de la phase test. Dix essais sont énoncés lors de la phase test, où l'expérimentateur ne fournit pas de *feedback* à l'enfant.

3.2.2.3. Évaluation de l'inhibition d'interférence

La tâche du Stroop animaux est une tâche évaluant les capacités d'inhibition de l'enfant au travers de la résistance à l'interférence (Wright et al., 2003). Le matériel se compose de trois planches expérimentales représentant des animaux (vache, cochon, mouton et canard) ainsi que de trois planches d'exemples (Annexe 5). La passation des trois planches expérimentales est chronométrée. Sur la feuille de cotation, l'expérimentateur répertorie les erreurs mais aussi le temps de réponse pour chaque planche. La passation se déroule individuellement avec l'enfant. Avant de débiter la passation, l'expérimentateur s'assure que l'enfant connaît bien les quatre animaux présentés sur les planches avec la première planche exemple.

La première planche contrôle-animaux est présentée à l'enfant avec les images d'animaux. La consigne donnée à l'enfant est la suivante : « Je vais te montrer des images d'animaux, je voudrais que tu me dises leur nom aussi bien et aussi vite que tu peux, en lisant de gauche à droite et ligne par ligne, sans t'arrêter entre chaque animal ». L'enfant ainsi nomme les animaux ligne par ligne le plus vite possible. Toute erreur doit immédiatement être corrigée.

Dans un second temps, on introduit la consigne de la seconde planche contrôle-visage, en présentant une planche exemple avec un corps de cheval associé à une tête de personnage humain. Les enfants doivent reconnaître les animaux à partir de leur corps. La consigne donnée pour cette seconde planche est la suivante : « Je vais te montrer des images étranges, la tête des animaux est différente de leur corps. Ils auront une tête de personnage de dessin animé. Tu vas devoir donner le nom du corps des animaux aussi bien et aussi vite que tu peux, en allant de gauche à droite et ligne par ligne, sans t'arrêter entre chaque animal. ». Comme pour la première planche, l'enfant nomme les animaux ligne par ligne le plus vite possible. Toute erreur doit immédiatement être corrigée.

Dans un troisième temps, la condition images incongruentes est présentée à l'enfant. Les animaux ont sur ces planches une tête d'animal différente du corps. On présente à l'enfant la troisième planche exemple avec un corps de cheval et une tête de chat. On demande alors à l'enfant de répondre par le nom du corps de l'animal en inhibant la présence d'une autre tête

d'animal (Figure 28). La consigne donnée est la suivante : « Je vais te montrer d'autres images étranges, la tête des animaux est différente de leur corps. Ils ont la tête d'un autre animal. Tu vas devoir me dire le nom du corps de l'animal aussi bien et aussi vite que tu peux, en allant de gauche à droite et ligne par ligne, sans t'arrêter entre chaque animal ». Comme pour les planches précédentes, l'enfant nomme les animaux ligne par ligne le plus vite possible. Toute erreur doit immédiatement être corrigée.

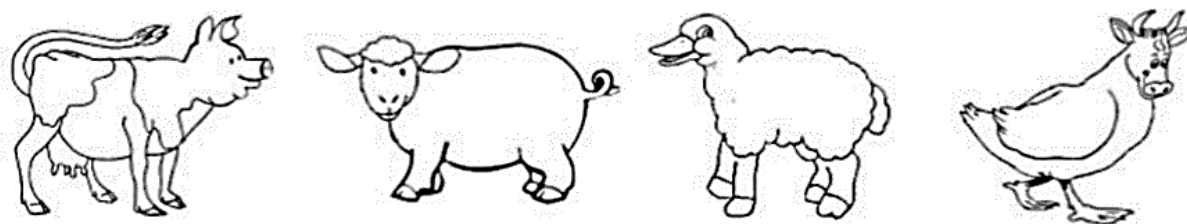


Figure 28. Extrait des items présentés sur la planche incongruente de la tâche de Stroop.

Les temps de complétion obtenus pour chaque planche nous permettaient d'obtenir une mesure du contrôle inhibiteur en effectuant une soustraction entre le temps de complétion entre la planche 3 incongruente et la planche 2 contrôle-visages. Les erreurs commises pour chaque planche ont également été comptées.

3.3. Résultats

3.3.1. Scores aux tâches comportementales

Les performances obtenues dans les différentes conditions la *Preschool-ANT* sont décrites dans le Tableau 5. La distribution des temps de réaction médians ne suit pas une loi normale ni pour les conditions congruentes ($W = 0,922$; $p < 0,001$) ni pour les conditions incongruentes ($W = 0,961$; $p = 0,029$).

Les performances obtenues à l'HTKS et au Stroop sont décrites dans le Tableau 6. La distribution des données dans la tâche HTKS ne suit pas une loi normale que ce soit pour la partie 1 ($W = 0,810$; $p < 0,001$), la partie 2 ($W = 0,871$; $p < 0,001$) ou le score total ($W = 0,897$; $p < 0,001$). La distribution des données sur la tâche de Stroop ne suit pas non plus une loi normale quelles que soient les conditions, notamment les temps de réaction pour les conditions contrôle-visages ($W = 0,868$; $p < 0,001$), contrôle-animaux ($W = 0,736$; $p < 0,001$) et incongruentes ($W = 0,726$; $p < 0,001$).

Tableau 5. Description des performances obtenues dans la tâche *Preschool-ANT*.

| | Moyenne des TR médians + écart type (ms) | Médiane des TR médians (ms) | 1 ^{er} quartile | 3 ^e quartile | Intervalle inter-quartile | % erreurs |
|---|--|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| Tâche complète | 7238 (1550) | 6888 | | | | 12,6 |
| Congruence (attention exécutive) | | | | | | |
| Condition Congruente | 1192 (307) | 1136 | 1014 | 1320 | 306 | 5,2 |
| <i>Congruent poissons</i> | 1220 (352) | 1144 | 963 | 1389 | 426 | 1,7 |
| <i>Congruent cochons</i> | 1214 (352) | 1124 | 991 | 1361 | 370 | 1,8 |
| <i>Congruent tortues</i> | 1168 (333) | 1116 | 953 | 1262 | 309 | 1,7 |
| Condition Incongruente | 1205 (263) | 1169 | 1035 | 1349 | 314 | 7,4 |
| <i>Incongruent poissons</i> | 1260 (343) | 1188 | 1022 | 1457 | 435 | 2,6 |
| <i>Incongruent cochons</i> | 1209 (300) | 1186 | 1029 | 1399 | 370 | 2,5 |
| <i>Incongruent tortues</i> | 1202 (299) | 1154 | 1154 | 1326 | 172 | 2,3 |
| Score de conflit | 13,7 (246) | 30,5 | -18,8 | 96,1 | 114,9 | |
| Congruence x Validité | | | | | | |
| Congruent valide | 1158 (294) | 1111 | 959 | 1313 | 354 | 2,9 |
| Congruent invalide | 1216 (331) | 1144 | 1005 | 1345 | 340 | 2,3 |
| Incongruent valide | 1201 (281) | 1156 | 1008 | 1388 | 380 | 4,3 |
| Incongruent invalide | 1231 (274) | 1163 | 1049 | 1402 | 353 | 3,6 |

Tableau 6. Description des performances obtenues dans les tâches HTKS et Stroop.

| | Moyenne + écart-type | Médiane | 1 ^{er} quartile | 3 ^e quartile | Intervalle inter-quartile | Minimum | Maximum |
|---|----------------------|---------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------|---------|
| HTKS | | | | | | | |
| <i>Score HTKS partie 1 (/20)</i> | 13,3 (6,7) | 17 | 8 | 18 | 10 | 0 | 20 |
| Stroop animaux | | | | | | | |
| Indice de contrôle inhibiteur | 37 (39,6) | 30,1 | 16,8 | 47,5 | 30,7 | -59 | 225 |
| <i>Temps de complétion planche contrôle animaux (exprimé en secondes)</i> | 49,2 (18,7) | 48 | 37 | 56,8 | 19,8 | 17 | 140 |
| <i>Temps de complétion planche contrôle visages (exprimé en secondes)</i> | 59,1 (32,2) | 48 | 40,1 | 63 | 22,9 | 24 | 220 |
| <i>Temps de complétion planche incongruente (exprimé en secondes)</i> | 96,1 (58,5) | 79,5 | 63,3 | 109 | 45,7 | 35 | 367 |
| <i>Nombre d'erreurs condition contrôle animaux</i> | 0,4 (0,86) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| <i>Nombre d'erreurs condition contrôle visages</i> | 0,5 (0,96) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| <i>Nombre d'erreurs condition incongruente</i> | 2,7 (2,65) | 2 | 1 | 4 | 3 | 0 | 12 |
| Nombre total d'erreurs | 3,7 (3,7) | 3 | 1 | 5 | 4 | 0 | 17 |

3.3.2. Performances à la *Preschool-ANT*

• Comparaison des temps de réaction entre les conditions congruentes et incongruentes

La distribution des données ne suivant pas une loi normale, nous avons effectué notre analyse statistique à l'aide du test de Wilcoxon pour échantillons appariés. Les temps de réaction médians étaient significativement plus élevés en condition incongruente qu'en condition congruente ($W = 805$; $p = 0,010$; rang de corrélation bisériale = $-0,353$; Figure 29). Les temps de réaction entre les conditions congruentes et incongruentes sont par ailleurs positivement corrélés d'après la corrélation de Spearman ($\rho = 0,785$; $p < 0,001$; Figure 30). Plus le temps de réaction en condition congruente augmente, plus le temps de réaction en condition incongruente augmente.

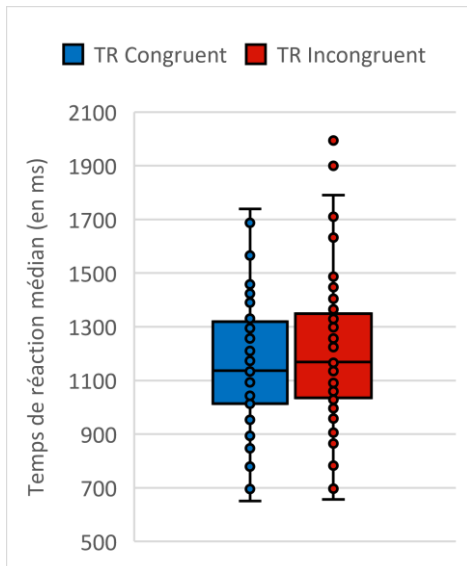


Figure 29. Temps de réaction médians à la *Preschool-ANT* pour les conditions congruentes et incongruentes.

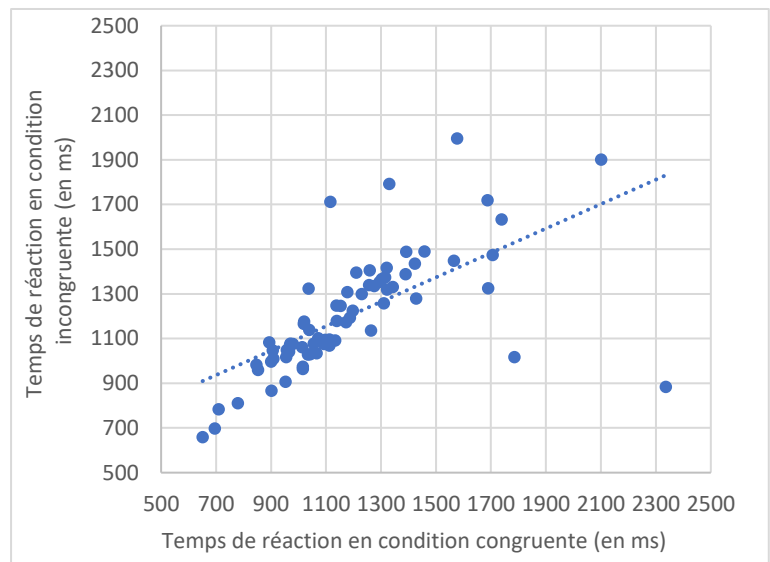


Figure 30. Rangs de corrélation entre les temps de réaction médians en condition incongruente en fonction des temps de réaction médians en condition congruente à la *Preschool-ANT*.

• Relation entre les performances obtenues à la *Preschool-ANT* et les performances obtenues dans les tâches HTKS et Stroop

La distribution des données dans les différentes tâches ne suivant pas une loi normale, nous avons effectué des analyses corrélationnelles non paramétriques de Spearman (Tableau 7).

Nous avons mis en évidence une corrélation négative des temps de réaction médians en condition incongruente à la *Preschool-ANT* avec le score obtenu à l'HTKS partie 1 ($\rho = -0,323$

; $p = 0,006$) et avec le nombre total d’erreurs en condition incongruente à la *Preschool-ANT* et le score obtenu à l’HTKS partie 1 ($\rho = -0,354$; $p = 0,003$).

Nous avons également mis en évidence une corrélation positive des temps de réaction médians en condition incongruente à la *Preschool-ANT* avec les temps de complétion en condition incongruente au Stroop ($\rho = 0,324$; $p = 0,006$) et avec le score de contrôle inhibiteur au Stroop ($\rho = 0,277$; $p = 0,020$). Nous avons mis en évidence une corrélation positive entre le nombre d’erreurs commises en condition incongruente à la *Preschool-ANT* et le nombre d’erreurs commises en condition incongruente au Stroop ($\rho = 0,350$; $p = 0,003$).

Nous n’avons pas observé de relation entre le score de conflit à la *Preschool-ANT* et le score de contrôle inhibiteur au Stroop. Cette absence de relation est également rapportée concernant les performances à l’HTKS partie 1.

Les performances obtenues à l’HTKS et au Stroop étaient liées, avec une relation négative entre le score obtenu à l’HTKS partie 1 et le temps de complétion en condition incongruente au Stroop ($\rho = -0,485$; $p < 0,001$), le score de contrôle inhibiteur obtenu au Stroop ($\rho = -0,319$; $p = 0,007$), et le nombre d’erreurs commises en condition incongruente au Stroop ($\rho = -0,308$; $p = 0,009$).

Tableau 7. Tableau récapitulatif des corrélations entre les performances obtenues dans les trois tâches : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules surlignées en jaune correspondent aux hypothèses formulées dans l’étude.

| | | <i>Preschool-ANT</i> | | | HTKS | Stroop | | |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|-------------------------------|
| | | TR incongruente | Score de conflit | Nombre d’erreurs incongruente | Score part ie 1 | TC incongruente | Contrôle inhibiteur | Nombre d’erreurs incongruente |
| <i>Preschool-ANT</i> | TR incongruente | - | 0,203 | 0,504 | 0,006 | 0,006 | 0,020 | 0,021 |
| | Score de conflit | 0,154 | - | 0,078 | 0,386 | 0,966 | 0,733 | 0,901 |
| | Nombre d’erreurs incongruente | 0,081 | 0,212 | - | 0,003 | <0,001 | 0,024 | 0,003 |
| HTKS | Score partie 1 | -0,323 | 0,105 | -0,354 | - | <0,001 | 0,007 | 0,009 |
| Stroop | TC incongruente | 0,324 | 0,005 | 0,512 | -0,485 | - | <0,001 | <0,001 |
| | Contrôle inhibiteur | 0,277 | -0,042 | 0,270 | -0,319 | 0,806 | - | <0,001 |
| | Nombre d’erreurs incongruente | 0,275 | -0,015 | 0,350 | -0,308 | 0,717 | 0,717 | - |

Note : TR = Temps de réaction ; TC = temps de complétion

3.4. Discussion

Nous avons mis en évidence, chez des enfants âgés de 4 ans à 5 ans 11 mois aux profils neurodéveloppementaux variés, que les enfants sont plus lents à fournir une réponse lorsque les stimuli sont présentés en condition incongruente dans notre tâche de *Preschool-ANT*, confirmant que malgré la simplification de la tâche pour les plus jeunes âges, nous conservons les propriétés essentielles de la tâche, en particulier du conflit du aux *flankers* incongruents. Les temps de réaction en condition incongruente, sont comparables aux valeurs rapportées dans des travaux utilisant une version adaptée de l'ANT proche de la nôtre, mais utilisant des paramètres permettant de qualifier les trois fonctions attentionnelles (Abundis-Gutiérrez et al., 2014; Rueda, Fan, et al., 2004b). La version d'Abundis-Gutiérrez et al. (2014), déjà adaptée de la version initiale de la *Child-ANT*, utilisait comme nous des *flankers* congruents et incongruents (pas de *flankers* neutres). Cependant, contrairement aux versions précédentes, notre tâche est uniquement destinée à des enfants d'âge préscolaire avec un format plus ludique, et adaptée pour inclure de la variabilité développementale.

Conformément à nos hypothèses, les temps de réaction et le nombre d'erreurs en condition incongruente à la *Preschool-ANT* sont liés au score à l'HTKS partie 1 ainsi qu'aux trois mesures de performance au Stroop (temps, erreurs et score de contrôle inhibiteur), dans la mesure où si l'enfant a de meilleures performances à l'une, il a de meilleures performances aux autres. Ceci soutient également la pertinence de notre tâche *Preschool-ANT* pour solliciter l'attention exécutive chez les enfants d'âge préscolaire, puisque la gestion du conflit cognitif et les capacités de contrôle inhibiteur, que ce soit en situation motrice comme dans l'HTKS ou lors de la présentation de stimuli visuels incongruents comme dans le Stroop, requièrent la mise en œuvre de l'attention exécutive. Dans des tâches comme la *Preschool-ANT* ou le Stroop, il s'agirait davantage d'une inhibition de l'interférence, tandis que l'HTKS implique une inhibition motrice. La capacité de contrôle inhibiteur peut permettre de résoudre le conflit cognitif en mobilisant l'attention sur le but de la tâche assignée, pour fournir la réponse comportementale adaptée. Si ces deux construits sont distingués chez le sujet adulte, il est probable qu'ils soient davantage indifférenciés chez de jeunes enfants (Karr et al., 2018). Durant la période préscolaire et même dès les premiers mois de vie, le développement du contrôle inhibiteur serait l'une des premières manifestations de l'attention exécutive (Fiske et al., 2022; Kerr-German et al., 2022). L'évolution des compétences sur le répertoire comportemental s'accompagne d'une maturation cérébrale au sein du cortex préfrontal et d'un contrôle plus accru du réseau exécutif sur le réseau de la saillance (Menon et Uddin, 2010). Il

n'est ainsi pas étonnant que les performances des enfants dans les trois tâches soient liées et que les enfants qui parviennent à mobiliser leur contrôle inhibiteur dans les tâches Stroop et HTKS, soient aussi ceux qui parviennent à détecter et résoudre le conflit cognitif dans la *Preschool-ANT*. Notons cependant que le contrôle inhibiteur ne suffit pas à lui seul à capturer les processus qui relèvent de l'attention exécutive (Tiego et al., 2020).

Bien que notre tâche semble permettre une évaluation de l'attention exécutive auprès d'une population d'enfants d'âge préscolaire, certains paramètres seront peut-être à réévaluer, notamment car le score de conflit ne semble pas être dans notre étude un indicateur fiable du conflit cognitif perçu entre les conditions incongruentes et les conditions congruentes. En effet, aucune corrélation significative n'est mise en évidence entre le score de conflit de la *Preschool-ANT* et les autres mesures. Cette question a précédemment été soulevée dans la littérature par de Souza Almeida et collaborateurs (2021), soulignant que le développement croissant de versions adaptées de l'ANT peut compromettre la fiabilité de tels scores basés sur des différences de temps de réaction. Le temps de réaction est utilisé comme indicateur de la vitesse et de l'efficacité des processus mentaux mais il ne tient pas compte du nombre d'erreurs, or certains enfants ont pu sacrifier la vitesse au profit de l'exactitude. Les auteurs rappellent ainsi que le taux d'erreurs est tout aussi important que les temps de réaction dans des tâches comme l'ANT, et nous voyons dans notre étude que ce taux d'erreurs est associé aux performances de contrôle inhibiteur. Le calcul du score de conflit ne tient pas compte de cet effet. De plus, nous avons observé dans plus d'un tiers des enfants de notre échantillon (N=26), des scores de conflit négatifs indiquant que les temps de réaction médians des stimuli présentés en condition congruente sont plus élevés que les temps de réaction médians des stimuli présentés en condition incongruente. Ce résultat contre-intuitif peut également témoigner des limites liées à l'utilisation du temps de réaction, et souligne l'importance de relever les erreurs plutôt que de n'utiliser que le score de conflit. Des travaux ultérieurs devront s'attacher à définir les meilleures variables permettant d'exploiter ce type de tâche.

Nous pouvons aussi émettre l'hypothèse que notre tâche a été trop simplifiée en termes de saillance des stimuli cibles et des *flankers*, ce qui a pu réduire l'effet de conflit. Dans la *Child-ANT*, les stimuli sont au nombre de cinq par ligne (deux *flankers* de chaque côté de la cible) et la cible est visuellement peu saillante car le poisson a une forme relativement symétrique, et demande donc plus d'attention pour distinguer la tête de la queue. Dans la *Preschool-ANT*, les stimuli sont au nombre de trois (un *flanker* de chaque côté de la cible) mais surtout, nous avons introduit des stimuli moins symétriques. Il est beaucoup plus facile de

distinguer la tête de la queue sur les cochons et les tortues, et la cible est plus saillante. Cela peut conduire à une plus grande rapidité de traitement visuel de l'information en facilitant l'orientation de l'attention vers le stimulus central cible, qu'il soit congruent ou incongruent, et en facilitant la distinction de l'orientation de la cible.

Les études précédentes utilisant la *Child-ANT* ont comparé des groupes d'âge d'enfants au développement typique ou comparé les performances d'enfants à celles des adultes. Par exemple, dans l'étude de Rueda et collaborateurs (2004), quatre groupes d'enfants de 6 à 9 ans au développement typique (N = 48) ont été constitués. Notre échantillon est non seulement plus conséquent (N=70) mais il inclut des profils atypiques afin d'accroître la variabilité des performances. La variabilité inter-individuelles de performances exécutives est très importante, puisque dès la période préscolaire elle peut prédire la réussite scolaire ultérieure (Blair et Razza, 2007; Johnson et al., 2020). Notre travail ouvre la voie vers une meilleure caractérisation des diverses trajectoires développementales de l'attention exécutive, qui permettrait aux praticiens la conception d'interventions adaptées aux besoins spécifiques de chaque individu.

Cependant, l'analyse des performances comportementales est rarement suffisante pour comprendre les mécanismes liés à la mise en œuvre de compétences cognitives. Elle ne fournit pas d'informations sur les processus cérébraux sous-jacents, qui pourraient permettre de repérer des signes précurseurs de trajectoires développementales atypiques avant l'apparition de manifestations comportementales. À présent, nous allons montrer dans l'étude 2 comment nous avons mis à profit la *Preschool-ANT* pour évaluer les liens entre attention exécutive et traitement sensoriel tactile au niveau neural.

4. Étude 2 - Liens entre marqueurs électrophysiologiques de l'attention exécutive et du traitement sensoriel tactile

4.1. Contexte et objectifs

L'étude 1 nous a permis de montrer que les mesures comportementales de l'allocation des ressources attentionnelles et le traitement sensoriel tactile sont liées, et de développer un outil pour quantifier les performances d'attention exécutive auprès d'une population d'enfants d'âge préscolaire qui soit également adapté à la mesure des corrélats neurophysiologiques des réponses comportementales. La littérature concernant les marqueurs neuronaux impliqués dans l'attention exécutive chez de jeunes enfants est encore limitée. Dans cette deuxième étude, notre intérêt s'est porté vers deux potentiels évoqués liés à la mise en œuvre de l'attention exécutive : la réponse N2 et les composantes positives tardives (LPC). La réponse N2 est une composante

négative observée en région fronto-pariétale, associée à la détection de conflit cognitif. Chez les enfants, cette réponse est observée entre 600 et 800 ms post stimuli (Rueda et al., 2004) et son amplitude est plus élevée en condition incongruente qu'en condition congruente. Les composantes positives tardives (LPC) sont également sensibles à la détection de conflit cognitif et plutôt observées précédant la réponse comportementale, chez de jeunes enfants entre l'âge de 4 et 7 ans, autour de 600 et 1000 ms post-stimuli (Abundis-Gutiérrez et al., 2014). Elles peuvent être observées en région fronto-centrale et en région pariétale. Les deux articles précédemment cités rapportent des pics de LPC plus élevés en condition congruente en région fronto-centrale et des pics positifs plus élevés en condition incongruente en région pariétale chez de jeunes enfants dès l'âge de 4 ans. Ce potentiel répondant à des conditions différentes dans deux zones différentes pourrait traduire différentes étapes liées à la résolution de conflit, ou signaler une activation post-réponse pour des ajustements ultérieurs et le maintien d'un contrôle soutenu tout au long de la tâche (Dosenbach et al., 2008). Les travaux précédents sur la *Child-ANT* ne sont pas parvenus à déterminer si les deux composantes, N2 et LPC, représentent des potentiels évoqués associés aux mêmes systèmes de traitement de conflit ou s'ils relèvent de mécanismes différents. Notre intérêt s'est porté sur les potentiels évoqués observés en région fronto-centrale, en lien avec la maturation du cortex préfrontal durant la période préscolaire.

Nous ne disposons pas d'outil pour quantifier les corrélats cérébraux du traitement sensoriel tactile. Comme le souligne la revue de littérature d'Eeles et collaborateurs (2013), il existe peu de mesures directes du traitement sensoriel dans la modalité tactile. Nous avons donc conçu, en collaboration avec l'entreprise Caylar SAS (Villebon-sur-Yvette, France), une matrice en silicone médical présentant des stimuli vibrotactiles sur l'avant-bras. Nous avons intégré ces stimuli au sein d'un paradigme de type *oddball*-omission. Les paradigmes de ce type permettent de mettre en évidence la prédiction sensorielle, et son corollaire en situation prévisible la suppression par répétition (SR), dès le plus jeune âge, en étudiant les réponses cérébrales à des stimuli répétés, des stimuli rares dits déviants, et des absences de stimulus au sein de la séquence (omissions). Nous avons caractérisé le traitement des stimuli tactiles en mesurant les variations d'amplitude de la réponse N140, composante des potentiels évoqués tactiles, au sein du cortex somatosensoriel. Nous nous sommes intéressés à la SR de cette composante au cours de la répétition de stimuli, et à la négativité de discordance (MMN) associée à la détection de changement et reflétant l'erreur de prédiction lors de la présentation d'un stimulus inhabituel ou inattendu (Näätänen et al., 2007). Nous avons également mesuré la

réponse positive P300 en région fronto-centrale, reflet de l'engagement attentionnel suscité par le stimulus (Chennu et al., 2013; Rutiku et al., 2015).

Nous avons caractérisé les réponses neurales aux différentes conditions de la *Preschool-ANT*, puis aux différentes conditions du protocole *oddball*-omission dans la modalité tactile, avant d'explorer leurs relations.

Concernant les réponses fronto-centrales à la *Preschool-ANT*, nous formulons l'hypothèse d'une amplitude de la réponse N2 plus élevée en condition incongruente qu'en condition congruente et d'une amplitude des LPC plus élevée en condition congruente qu'en condition incongruente.

Concernant les réponses cérébrales dans le paradigme *oddball*-omission tactile, nous faisons l'hypothèse d'une diminution de l'amplitude de la N140 entre le début et la fin de la séquence en région somatosensorielle et une diminution de l'amplitude de la P300 en région fronto-centrale (suppression par répétition). Nous avons également exploré les réponses cérébrales aux stimuli déviants et aux stimuli suivant une omission, en faisant l'hypothèse d'une MMN en région somatosensorielle et une amplitude de la réponse P300 plus élevée en région fronto-centrale dans les deux conditions.

Concernant les relations entre les corrélats électrophysiologiques de l'attention exécutive et ceux de la prédiction somatosensorielle, nous formulons les hypothèses que les différences d'amplitude des ondes N2 et LPC entre les conditions congruentes et incongruentes de la *Preschool-ANT* (modulation de l'activité neurales par le conflit cognitif) seraient toutes deux corrélées :

- aux différences d'amplitude de la N140 en région somatosensorielle et de la P300 en région fronto-centrale entre le début et la fin de la séquence (SR des potentiels évoqués par la stimulation tactile),

- aux différences d'amplitude de la N140 en région somatosensorielle (MMN) et de la P300 en région fronto-centrale entre les stimuli standards et déviants, et entre les stimuli standards et ceux présentés après une omission (post-omissions), dans la séquence de stimulation tactile (réponses aux violations de prédiction).

Il était difficile de prévoir le sens de ces relations, parce que la littérature n'offre pas de consensus sur le sens des potentiels évoqués en fonction des performances, notamment concernant le protocole tactile. On ne peut donc pas savoir si une augmentation d'amplitude des composantes traduit un traitement plus efficace (performance accrue), ou moins efficient (coût cognitif accru à performance équivalente).

Enfin, concernant les liens entre corrélats électrophysiologiques et évaluations comportementales, nous formulons l'hypothèse que l'amplitude de la suppression par répétition des N140 somatosensorielle et P300 fronto-centrale, ainsi que les amplitudes des réponses de *mismatch* aux stimuli déviants et post-omissions, seraient positivement corrélées au score composite exécutif global et aux scores obtenus aux différentes échelles de la BRIEF-P. Nous formulons également l'hypothèse que les différences d'amplitude des ondes N2 et LPC entre les conditions congruentes et incongruentes de la *Preschool-ANT* seraient négativement corrélées au score de traitement sensoriel dans la modalité tactile obtenu au PSD.

4.2. Méthode

Cette étude a reçu un avis favorable du Comité de Protection des Personnes Ile de France X le 1^{er} juillet 2020 (2020-A011503-36 RIPH-3 HPS).

4.2.1. Participants

Pour être inclus dans l'étude, les enfants devaient être âgés de 4 ans (entre 48 et 59 mois) et être scolarisés en Petite, Moyenne ou Grande section de maternelle. Ils ne devaient pas présenter de retard psychomoteur ou de troubles sévères du comportement ni être sous traitement par psychotropes. Le consentement verbal de l'enfant devait être recueilli après avoir reçu les explications de l'investigateur et les parents ou tuteurs de l'autorité parentale devaient avoir donné leur consentement éclairé par écrit. Tout enfant ne remplissant pas ces critères ne pouvait pas participer à l'étude.

La prise de contact avec les parents a été effectuée par des brochures distribuées dans différents établissements du département du Calvados accueillant des enfants dans la tranche d'âge concernée tels que les centres sportifs, centres de loisirs et établissements médico-sociaux. Dès que les parents acceptaient la participation de leur enfant en prenant contact avec l'investigatrice, un créneau adapté à l'enfant et aux disponibilités des parents et/ou de la structure d'accueil leur était proposé.

28 enfants ont participé à l'étude (âge moyen = 4 ans 5 mois ; écart-type \pm 3 mois ; 11 filles). Ils étaient hébergés au sein de leur domicile familial. Parmi ces enfants, trois sont nés prématurément et quatre bénéficient d'un suivi psycho-éducatif.

Les effectifs de participants pour les hétéro-questionnaires, les mesures comportementales et les mesures en EEG sont présentés en Figure 31. Tous les parents ont

complété la BRIEF-P et le Profil Sensoriel. Tous les enfants ont réalisé l'ensemble des mesures comportementales et des mesures EEG proposées. Cependant, tout comme dans l'étude 1B, tous les enfants n'ont pas réalisé la partie 2 de l'HTKS, plus complexe. Nous utiliserons pour l'HTKS les données obtenues dans la partie 1. De plus, après pré-traitement et analyse des données EEG pour la *Preschool-ANT* et le protocole *oddball-omission*, 6 enfants ont été exclus des analyses (3 enfants par tâche). Il restait donc pour tester nos hypothèses principales sur les corrélats neurophysiologiques 22 enfants (âge moyen = 4 ans 6 mois ; écart-type \pm 3 mois ; 10 filles ; 3 présentant des trajectoires développementales à risque).

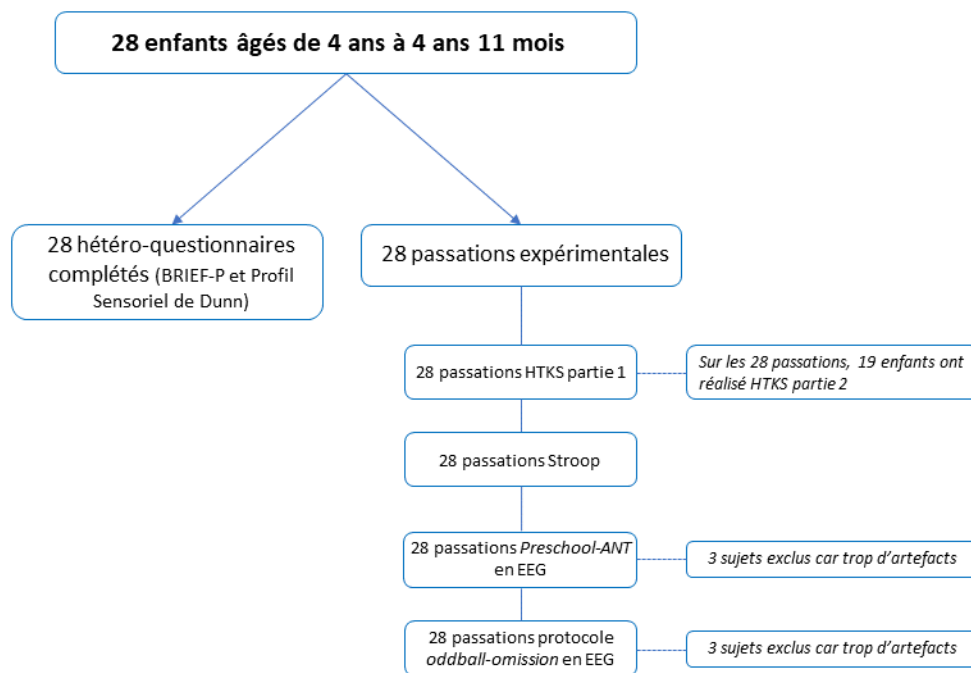


Figure 31. Description des effectifs au sein des différentes mesures expérimentales de notre étude.

4.2.2. Protocole expérimental

Les passations se sont déroulées au sein du laboratoire COMETE situé au Pôle des Formations et de Recherche en Santé à Caen. Les parents ont été invités à venir avec leur enfant dans les locaux du laboratoire après avoir pris connaissance des documents d'information et de consentement pour participer à l'étude. Un formulaire de droit à l'image leur était également remis, pour nous permettre s'ils l'acceptaient la diffusion d'images et vidéos prises durant les passations. Les participants n'étaient pas rémunérés et tous les enfants ont reçu un « diplôme » à l'issue de leur participation.

Chaque passation a duré environ 2h30 (temps variable en fonction des profils d'enfants accueillis). Les enfants ont réalisé dans un ordre randomisé le bloc de tâches comportementales

décrites dans l'étude 1B (HTKS et Stroop) et le bloc EEG (la *Preschool-ANT* et le paradigme *oddbal*-omission tactile). L'ordre des tâches au sein des blocs (bloc comportemental ou bloc EEG) était lui-même randomisé. Pendant ce temps, les parents ont été invités à compléter les hétéro-questionnaires précédemment décrits dans l'étude 1A (BRIEF-P et PSD), ainsi qu'un questionnaire d'inclusion permettant de recueillir des informations relatives à la naissance de leur enfant, son sexe, le type de scolarité, et le suivi psycho-éducatif. Les parents pouvaient également laisser un commentaire libre s'ils en exprimaient la nécessité et pour nous permettre d'identifier, le cas échéant, un besoin d'orientation vers une structure spécialisée.

4.2.2.1. *Hétéro-questionnaires et mesures comportementales*

L'acquisition et le traitement des réponses fournies par les parents à la BRIEF-P et au questionnaire du PSD, ainsi que des performances obtenues par les enfants à l'HTKS et au Stroop sont analogues à ceux décrits dans l'étude 1A et B.

4.2.2.2. *Mesures en électroencéphalographie*

L'activité neuronale a été mesurée à l'aide d'un filet EEG composé de 129 électrodes (Magstim EGI, Eugene, Oregon, États-Unis) à une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz. L'impédance a été maintenue en dessous de 100 k Ω pendant la procédure. L'installation du filet EEG pour les deux mesures était réalisée dans une salle adjacente à celle où étaient effectuées les mesures comportementales. Les enfants étaient invités à préparer avec l'expérimentateur les étapes préalables à la pose du filet. Après avoir déterminé le périmètre crânien du sujet, nécessaire au choix du filet EEG adapté à l'enfant, le filet EEG devait reposer pendant 5 minutes dans un seau d'eau tiède avec des électrolytes. Pendant ce temps, l'expérimentateur prenait la mesure du vertex entre le nasion et l'inion et entre les deux points pré auriculaires.

Après la pose du filet EEG, les enfants étaient ensuite invités à s'installer dans une cage de Faraday décorée et aménagée, afin de limiter les champs électromagnétiques. Les parents pouvaient être présents durant l'installation du matériel et assister à l'enregistrement EEG depuis l'extérieur de la cage de Faraday. Un expérimentateur restait à l'extérieur de la cage de Faraday durant l'acquisition pour vérifier le bon déroulé du protocole et noter le cas échéant certains événements susceptibles d'interférer dans l'interprétation des données (enfant qui bouge beaucoup, par exemple). La luminosité de la pièce était assombrie pendant l'acquisition.

- Preschool-ANT

Afin de permettre l'acquisition d'un nombre suffisant de segments EEG et de minimiser l'exclusion de sujets nous avons modifié le nombre d'essais par bloc expérimental par rapport à la version développée pour l'étude 1B, passant de 36 à 48 essais par bloc, soit 144 essais au total. Les réponses n'étaient plus à fournir sur les flèches du clavier d'un ordinateur mais sur un boîtier-réponse disposant de deux boutons, l'un à droite et l'un à gauche. Durant la passation de la tâche, les enfants étaient assis sur une chaise haute, face à un écran d'ordinateur les mains placées à côté du boîtier de réponse. Ils portaient un casque audio pour entendre les *feedbacks* sonores lorsqu'ils fournissent une bonne réponse. Un expérimentateur restait à l'intérieur de la cage de Faraday pour donner les instructions à l'enfant, tandis qu'un second expérimentateur contrôlait l'acquisition des données et le lancement des trois blocs expérimentaux.

Les données ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bande FIR avec un seuil passe-haut de 0,3 Hz et un seuil passe-bas de 20 Hz (gain en bande passante : 99,88 % (-0,01 dB), gain en bande d'arrêt : 1,0 % (-40,0 dB), *Rolloff* : 0,99 Hz) dans le logiciel EEG Net Station 5.4. Concernant la différence de seuil passe-haut à 0,3 Hz, nous avons sélectionné ce paramètre analogue aux études utilisant la *Child-ANT*, en particulier l'étude la plus récente et la plus proche de notre version (Abundis-Gutiérrez et al., 2014).

Les étapes ultérieures de pré-traitement ont été réalisées dans un programme Matlab personnalisé réalisé par un membre de l'équipe de recherche, Anne-Lise Marais. Ce programme a permis d'extraire des segments spécifiques en fonction des différentes conditions expérimentales (congruence, validité, type d'animal) et de la justesse de la réponse donnée par le participant. Un minimum de 12 segments sans artefact, d'une période de -200ms à 1100ms autour de l'apparition des stimuli à l'écran, au cours desquels le sujet avait fourni une réponse comportementale correcte, était requis pour chaque modalité de la condition congruence sur laquelle reposent nos hypothèses. Nous avons déterminé une ROI en région fronto-centrale, formée de plusieurs électrodes dont le signal était moyenné, à partir des données EEG rapportées dans l'étude de Rueda et collaborateurs (2004) et dans l'étude d'Abundis-Gutiérrez et collaborateurs (2014) : les électrodes FCz (6), 7, FC1 (13), 106, FC2 (112) (Figure 32).

Afin d'extraire les valeurs des pics d'amplitude des potentiels évoqués d'intérêt, nous avons délimité des fenêtres temporelles d'intérêt adaptées à leur latence d'apparition plus tardive chez les enfants en comparaison à des adultes. Ainsi, pour la réponse N2, nous avons segmenté de 300 à 550ms post-stimulus et pour la LPC, de 700 à 1000 ms post-stimulus. Pour

chaque sujet et dans chaque fenêtre, nous avons d’abord défini la latence à laquelle les valeurs sont le plus différentes entre les conditions congruentes et incongruentes (valeur de *mismatch* maximale). Ensuite, à cette latence, nous avons extrait l’amplitude des pics, et leur différence qui correspond à l’amplitude de *mismatch* maximale dans les fenêtres temporelles d’intérêt respectives (Figure 33).

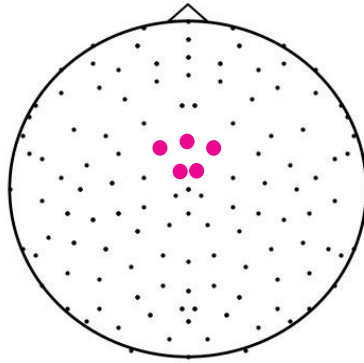


Figure 32. Électrodes formant la ROI en région fronto-centrale.

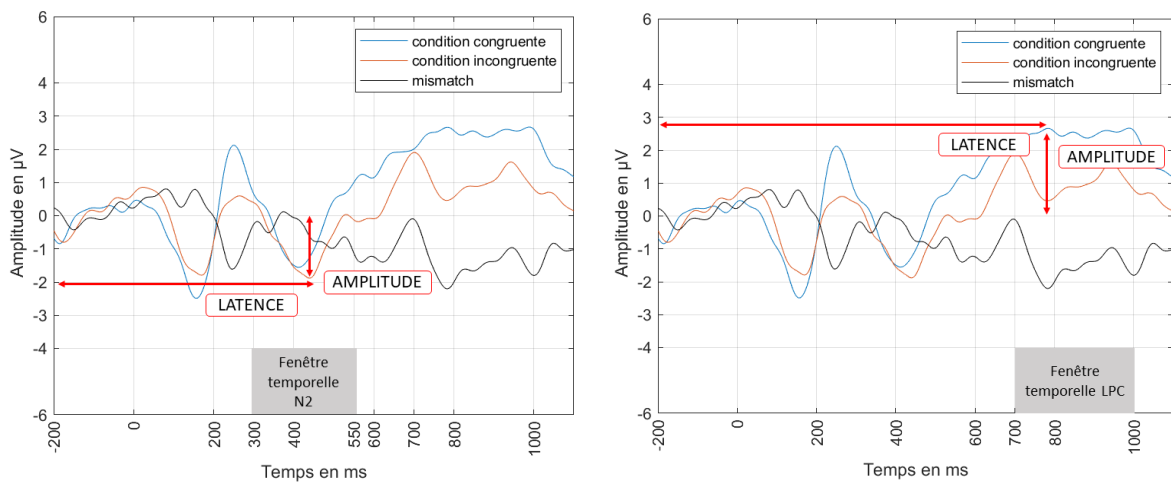


Figure 33. Exemples de calcul d’amplitude d’une réponse N2 en condition incongruente (à gauche) et de LPC en condition congruente (à droite) dans les fenêtres temporelles d’intérêt respectives.

- Protocole *oddball*-omission dans la modalité tactile

Une matrice vibrotactile de 6x3 cm développée sur mesure (Caylar SAS, France), contenant trois colonnes de six vibreurs enveloppés dans du silicone médical a été utilisée pour présenter des stimuli tactiles (Figure 34). Leurs temps de vibration se chevauchaient partiellement pour imiter une caresse continue durant 200 ms. Les enfants étaient invités à s’allonger sur un fauteuil puis l’expérimentateur installait la matrice sur leur avant-bras droit (à l’exception d’un sujet stimulé sur l’avant-bras gauche en raison d’une sensibilité liée à une blessure sur l’avant-bras droit), maintenue par un filet de coton (Figure 35). Les enfants

portaient un casque anti-bruit diffusant de la musique classique pour ne pas entendre le son des vibrations. Pour les aider à rester éveillés et immobiles, ils étaient assis à 1,5 mètre d'un écran diffusant une vidéo de ronds noirs et rouges en mouvement (sans contenu sémantique ni structure temporelle).



Figure 34. Matrice vibratoire développée par Caylar SAS.



Figure 35. Installation d'un participant pour le protocole oddball-omission.

Le protocole comprenait 290 essais répartis en trois phases, pour une durée totale de 18 minutes (Figure 36). La première phase (familiarisation) et la dernière phase (contrôle) contenaient 40 essais standards et étaient utilisées pour quantifier la suppression par répétition. Entre ces phases étaient présentés 30 blocs contigus formés de sept stimuli pseudo-randomisés dont cinq standards (un standard de chaque bloc était aléatoirement choisi pour la comparaison statistique ultérieure avec les non-standards), un déviant (la direction de la vibration était inversée) et une omission. Les stimulations non standards n'étaient jamais consécutives et les directions des stimulations standard et déviantes étaient contrebalancées aléatoirement entre les sujets. L'intervalle entre les stimuli variait pseudo-aléatoirement entre 3300 ms et 3700 ms. Les omissions créaient un intervalle de 7000 ms. Un essai standard suivant une omission est qualifié de post-omission.

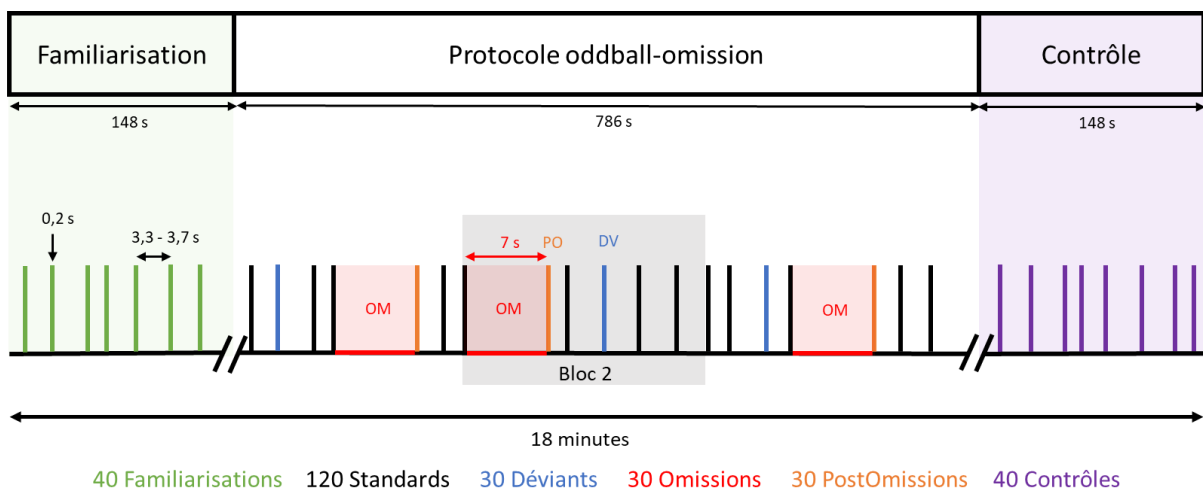


Figure 36. Protocole expérimental *oddball-omission*.

Les données ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bande FIR avec un seuil passe-haut de 1 Hz et un seuil passe-bas de 20 Hz (Gain en bande passante : 99,88 % (-0,01 dB), gain en bande d'arrêt : 1,0 % (-40,0 dB), *Rolloff* : 0,99 Hz) dans le logiciel EEG NetStation 5.4. Les données ont ensuite été prétraitées avec un programme Matlab personnalisé réalisé par un membre de l'équipe de recherche, Anne-Lise Marais. Nous avons délimité nos régions d'intérêt (ROI) à l'aide de huit électrodes réparties dans des régions spécifiques : les électrodes 28, 29, 35, C3 (36), C5 (41), CP3 (42), CP5 (47) et P3 (52) pour la région somatosensorielle controlatérale, tandis que les électrodes 5, FCz (6), 7, 12, FC1 (13), 106, FC2 (112) et Cz (129) ont été sélectionnées dans la région fronto-centrale (Figure 37). Pour le sujet qui a reçu la stimulation sur l'avant-bras gauche, nous avons utilisé le schéma d'électrodes inversé concernant les ROIs.

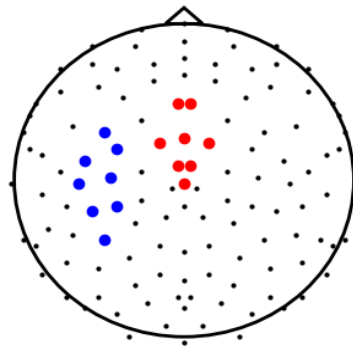


Figure 37. Électrodes utilisées pour déterminer les deux ROIs, la région somatosensorielle en bleu et la région fronto-centrale en rouge.

Afin d'extraire les valeurs des pics d'amplitude des potentiels évoqués d'intérêt, nous avons délimité des fenêtres temporelles d'intérêt adaptées à leur latence d'apparition plus tardive chez les enfants en comparaison à des adultes. Ainsi, pour obtenir le pic d'amplitude de la réponse N140, nous avons segmenté de 140 à 350 ms après le début du stimulus et pour la P300, de 300 à 800 ms après le début du stimulus. Pour chaque sujet, nous avons défini la latence à laquelle la différence d'amplitude est maximale dans chaque fenêtre pour la ROI correspondante (latence de *mismatch* maximale) entre les conditions comparées (Figure 38). À cette latence, nous avons extrait les amplitudes des conditions à comparer et calculé leur différence. La suppression par répétition (SR) des réponses correspond à la différence des amplitudes entre les phases de familiarisation (début de séquence) et contrôle (fin de séquence). La détection des stimuli déviants et suivant une omission, associés à l'erreur de prédiction (MMN), correspond à la différence des amplitudes entre les conditions déviantes ou les conditions post-omission, et les conditions stimuli standards.

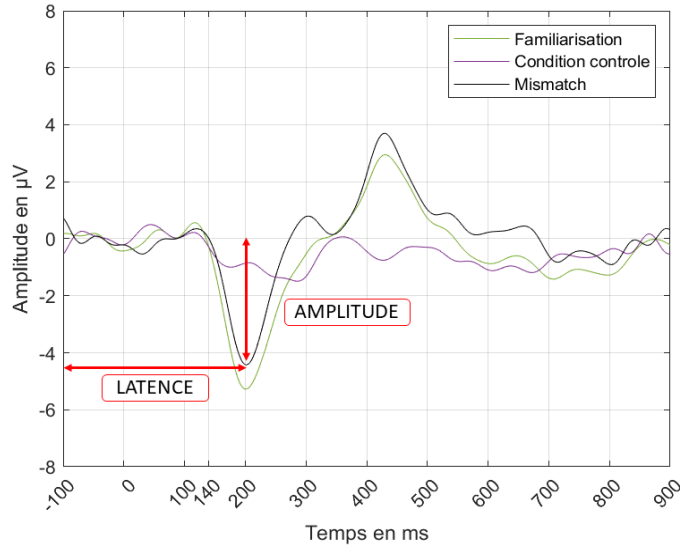


Figure 38. Exemple pour la suppression par répétition en région somatosensorielle, de la latence et d'un pic d'amplitude sur la courbe de *mismatch*.

4.3. Résultats

La normalité des distributions a été testée avec le test de Shapiro-Wilk pour l'ensemble des données avec un seuil de risque $\alpha < 0,05$.

4.3.1. Évaluations comportementales

Les scores obtenus aux questionnaires BRIEF-P et PS, ainsi qu'aux tâches HTKS et Stroop sont présentés dans le Tableau 8. Les résultats de la BRIEF-P ne suivent pas une loi normale pour plusieurs échelles, ni pour le score composite exécutif global ($W = 0,921$; $p = 0,036$). Quatre enfants ont obtenu un score composite exécutif global supérieur ou égal au seuil considéré comme cliniquement anormal (seuil fixé à 65). Les résultats du PSD suivent une loi normale ($W = 0,960$; $p = 0,344$).

Nous avons analysé de la même manière que dans l'étude 1B les réponses comportementales à la tâche *Preschool-ANT* de cet échantillon d'enfants plus jeunes (Tableau 9). La distribution des données suit une loi normale dans les conditions congruente ($W = 0,986$; $p = 0,973$) et incongruente ($W = 0,956$; $p = 0,349$). La distribution des données dans la tâche HTKS ne suit pas une loi normale que ce soit pour la partie 1 ($W = 0,755$; $p < 0,001$) ou le score total ($W = 0,902$; $p = 0,013$). La distribution des données sur la tâche de Stroop ne suit pas non plus une loi normale dans toutes les conditions expérimentales, notamment les temps de réaction pour les conditions contrôle-animaux ($W = 0,805$; $p < 0,001$), contrôle-visages ($W = 0,801$; $p < 0,001$) et incongruentes ($W = 0,825$; $p < 0,001$).

Chapitre 4 – Contributions expérimentales

Tableau 8. Description des réponses aux BRIEF-P et PSD, et des performances dans les tâches HTKS et Stroop.

| | Moyenne + Écart-type | Médiane | 1^{er} quartile | 3^e quartile | Intervalle inter- quartile | Minimum | Maximum |
|---|---------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| BRIEF-P | | | | | | | |
| Score composite exécutif global | 52 (10,6) | 51,5 | 47,3 | 55 | 7,7 | 35 | 82 |
| <i>Inhibition</i> | 53,1 (12,1) | 51 | 44,8 | 56,5 | 11,7 | 35 | 80 |
| <i>Flexibilité</i> | 50,1 (8,64) | 51 | 42 | 55 | 13 | 39 | 68 |
| <i>Mémoire de Travail</i> | 49,2 (10,6) | 48 | 40,5 | 56,5 | 16 | 38 | 76 |
| <i>Planification</i> | 53,9 (8,96) | 54 | 50,8 | 57,8 | 7 | 38 | 76 |
| <i>Contrôle émotionnel</i> | 51,9 (10,5) | 50 | 43,8 | 56,5 | 12,7 | 38 | 78 |
| Profil Sensoriel de Dunn | | | | | | | |
| Score de traitement sensoriel tactile (/90) | 78 (7,3) | 79 | 74,3 | 83 | 8,7 | 61 | 90 |
| HTKS | | | | | | | |
| Score HTKS partie 1 (/20) | 14,1 (6,88) | 17,5 | 11 | 18 | 7 | 0 | 20 |
| Stroop animaux | | | | | | | |
| Score de contrôle inhibiteur | 44,4 (32,4) | 34 | 25,8 | 53,5 | 29,7 | 5 | 151 |
| <i>Temps de complétion planche contrôle animaux (exprimé en secondes)</i> | 49,3 (23,3) | 42 | 36,5 | 57 | 20,5 | 21 | 116 |
| <i>Temps de complétion planche contrôle visages (exprimé en secondes)</i> | 61,5 (31,3) | 54 | 46 | 60,3 | 14,3 | 23 | 146 |
| <i>Temps de complétion planche incongruente (exprimé en secondes)</i> | 106 (54,1) | 86 | 73,8 | 115 | 41,2 | 35 | 240 |
| <i>Nombre d'erreurs condition contrôle animaux</i> | 0,3 (1,15) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| <i>Nombre d'erreurs condition contrôle visages</i> | 0,9 (1,64) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| <i>Nombre d'erreurs condition incongruente</i> | 3,5 (4,68) | 3 | 1 | 5,25 | 4,25 | 0 | 13 |
| Nombre total d'erreurs | 4,7 | 3,5 | 1 | 6,5 | 5,5 | 0 | 17 |

Tableau 9. Description des performances obtenues à la *Preschool-ANT*.

| | Moyenne des TR médians + écart type (ms) | Médiane des TR médians (ms) | % erreurs |
|---|---|------------------------------------|------------------|
| Congruence (attention exécutive) | | | |
| Condition Congruente | 1121 (125) | 1127 | 8 |
| Condition Incongruente | 1178 (145) | 1236 | 6,9 |
| Score de conflit | 56,9 (86,3) | 46,5 | |
| Validité (attention d'orientation) | | | |
| Indices valides | 1134 (135) | 1152 | 7,8 |
| Indices invalides | 1168 (163) | 1210 | 8,1 |
| Congruence x Validité | | | |
| Congruent valide | 1116 (134) | 1129 | 4,1 |
| Congruent invalide | 1155 (163) | 1137 | 4,22 |
| Incongruent valide | 1177 (185) | 1182 | 3,48 |
| Incongruent invalide | 1155 (150) | 1201 | 3,66 |

4.3.2. *Relations entre les scores obtenus à la BRIEF-P et à la section de traitement de l'information sensorielle tactile du PSD*

La distribution des données ne suivant pas une loi normale pour les réponses fournies à la BRIEF-P, nous avons réalisé des analyses corrélationnelles non paramétriques de Spearman (Tableau 10). Les résultats ont mis en évidence une corrélation négative entre le score composite exécutif global obtenu à la BRIEF-P et le score de traitement de l'information tactile au PSD ($\rho = -0,492$; $p = 0,008$). Plus le score composite exécutif est élevé (davantage de difficultés), plus le score de traitement tactile est faible (davantage de difficultés). La corrélation persiste avec plusieurs indices de l'échelle BRIEF-P : l'inhibition ($\rho = -0,461$; $p = 0,014$), la flexibilité ($\rho = -0,597$; $p < 0,001$) et la mémoire de travail ($\rho = -0,487$; $p = 0,009$). Cette corrélation n'était pas significative mais tendancielle concernant la planification ($\rho = -0,362$; $p = 0,059$). En revanche, nous n'avons pas observé de différence significative entre le score de traitement de l'information tactile et l'échelle de contrôle émotionnel ($\rho = -0,312$; $p = 0,106$). Nous avons donc répliqué les résultats précédemment décrits dans l'étude 1A sauf pour l'échelle de contrôle émotionnel.

Tous les indices de l'échelle BRIEF-P ne sont pas corrélés entre eux. Nous mettons en évidence une corrélation positive entre les échelles d'inhibition et l'indice de mémoire de travail ($\rho = 0,559$; $p = 0,002$), l'indice de planification ($\rho = 0,545$; $p = 0,003$) et l'indice de contrôle émotionnel ($\rho = 0,672$; $p < 0,001$). L'indice de mémoire de travail est également positivement corrélé à l'indice de planification ($\rho = 0,823$; $p < 0,001$).

Tableau 10. Tableau récapitulatif des corrélations entre les hétéro-questionnaires : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules en jaune correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude.

| | | BRIEF-P | | | | | | |
|---------|---------------------|-------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| | | Tactile PSD | GEC | Inhibition | Flexibilité | MDT | Planification | Contrôle émotionnel |
| BRIEF-P | Tactile PSD | - | 0,008 | 0,014 | <0,001 | 0,009 | 0,059 | 0,106 |
| | GEC | -0,492 | - | <0,001 | 0,033 | <0,001 | <0,001 | 0,001 |
| | Inhibition | -0,461 | 0,882 | - | 0,366 | 0,002 | 0,003 | <0,001 |
| | Flexibilité | -0,597 | 0,404 | 0,178 | - | 0,095 | 0,127 | 0,452 |
| | MDT | -0,487 | 0,788 | 0,559 | 0,322 | - | <0,001 | 0,184 |
| | Planification | -0,362 | 0,726 | 0,545 | 0,295 | 0,823 | - | 0,104 |
| | Contrôle émotionnel | -0,312 | 0,588 | 0,672 | 0,148 | 0,259 | 0,314 | - |

Note : PS = Profil Sensoriel ; GEC = Score Composite Exécutif global à la BRIEF-P ; MDT = Mémoire de travail

4.3.3. Performances à la Preschool-ANT

La distribution des données concernant les temps de réaction à la *Preschool-ANT* étant normale, nous avons effectué un test t de Student pour échantillons appariés. Nous avons mis en évidence une différence significative entre les temps de réaction médians des conditions congruentes et incongruentes ($t(24) = -3.30$; $p = 0,003$; d de Cohen = $-0,659$; Figure 39).

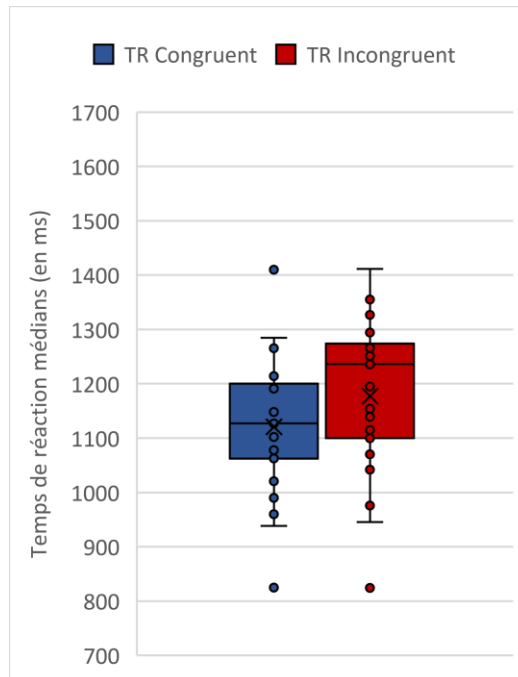


Figure 39. Moyennes des temps de réaction médians à la *Preschool-ANT* entre les conditions congruentes et incongruentes.

4.3.4. Relations entre les performances obtenues à la *Preschool-ANT* et les performances obtenues dans les tâches *HTKS* et *Stroop*

La distribution des données ne suivant pas une loi normale dans les différentes mesures comportementales, nous avons effectué des analyses corrélacionnelles de Spearman entre les performances à la *Preschool-ANT* et les performances à ces mesures (Tableau 11). Nous avons observé une corrélation négative du nombre d'erreurs commises en condition incongruente à la *Preschool-ANT* avec le score obtenu à l'HTKS partie 1 ($\rho = -0,462$; $p = 0,018$) et avec le nombre d'erreurs commises en condition incongruente au Stroop ($\rho = 0,399$; $p = 0,043$). Nous n'avons pas mis en évidence de corrélation significative des temps de réaction médians en condition incongruente ni du score de conflit à la *Preschool-ANT* avec le score HTKS partie 1. Nous n'avons pas mis en évidence de corrélation significative entre les temps de réaction médians en condition incongruente à la *Preschool-ANT* et les temps de complétion de la tâche Stroop. De façon attendue, le nombre d'erreurs commises en condition incongruente au Stroop étaient négativement corrélées au score HTKS partie 1 ($\rho = -0,473$; $p = 0,011$).

Tableau 11. Tableau récapitulatif des corrélations entre les performances dans les trois tâches : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules en jaune correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude.

| | | <i>Preschool-ANT</i> | | | <i>HTKS</i> | <i>Stroop</i> | | |
|----------------------|-------------------------|----------------------|------------------|-------------------------|---------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| | | TR incongruente | Score de conflit | Nb erreurs incongruente | Score Part 1 | TC incongruente | Contrôle inhibiteur | Nb erreurs incongruente |
| <i>Preschool-ANT</i> | TR incongruente | - | 0,007 | 0,876 | 0,314 | 0,543 | 0,749 | 0,296 |
| | Score de conflit | 0,508 | - | 0,421 | 0,648 | 0,709 | 0,945 | 0,704 |
| | Nb erreurs incongruente | -0,033 | 0,168 | - | 0,018 | 0,217 | 0,506 | 0,043 |
| <i>HTKS</i> | Score Part 1 | 0,210 | 0,096 | -0,462 | - | 0,134 | 0,198 | 0,011 |
| <i>Stroop</i> | TC incongruente | 0,128 | 0,079 | -0,250 | -0,290 | - | <,001 | <,001 |
| | Contrôle inhibiteur | 0,067 | 0,014 | 0,137 | -0,251 | 0,885 | - | 0,001 |
| | Nb erreurs incongruente | 0,218 | 0,080 | 0,399 | -0,473 | 0,609 | 0,575 | - |

Note : TR = Temps de réaction ; TC = temps de complétion

4.3.5. Potentiels évoqués liés à l'attention exécutive

Les moyennes des potentiels évoqués en région fronto-centrale par les conditions congruentes et incongruentes de la *Preschool-ANT*, en fonction des indices, sont présentées en Figure 40.

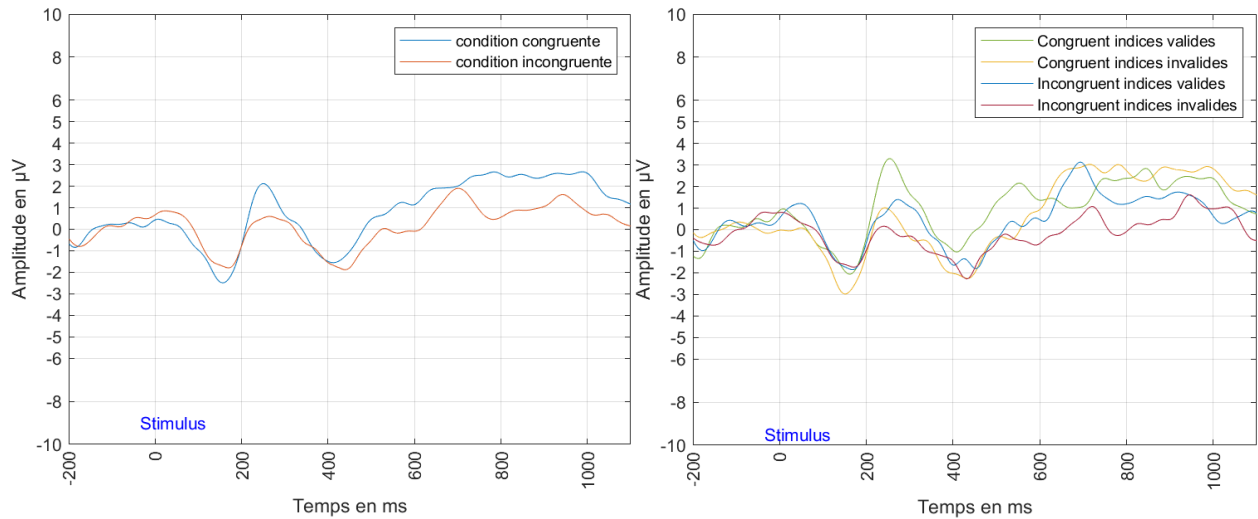


Figure 40. Moyenne des potentiels évoqués pour les conditions congruentes et incongruentes en région fronto-centrale (à gauche) et moyenne des potentiels évoqués pour les conditions congruentes et incongruentes en fonction des indices valides et invalides en région fronto-centrale (à droite).

La distribution des amplitudes de la N2 suivait une loi normale, pour la condition congruente ($W = 0,960$; $p = 0,419$) et la condition incongruente ($W = 0,950$; $p = 0,253$). Nous avons mis en évidence une amplitude de la N2 significativement plus ample en condition incongruente par rapport à la condition congruente ($t(24) = 4,45$; $p < 0,001$; d de Cohen = $0,890$; Figure 41).

La distribution des amplitudes des LPC suivait une loi normale, pour la condition congruente ($W = 0,977$; $p = 0,813$) et la condition incongruente ($W = 0,971$; $p = 0,673$). Nous avons mis en évidence une amplitude de la LPC significativement plus ample en condition congruente par rapport à la condition incongruente ($t(24) = 6,22$; $p < 0,001$; d de Cohen = $1,243$; Figure 42).

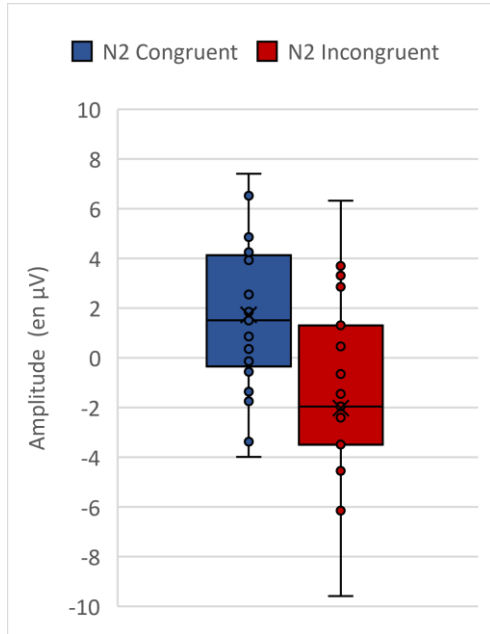


Figure 41. Amplitudes moyennes de la réponse N2 pour les conditions congruentes et incongruentes.

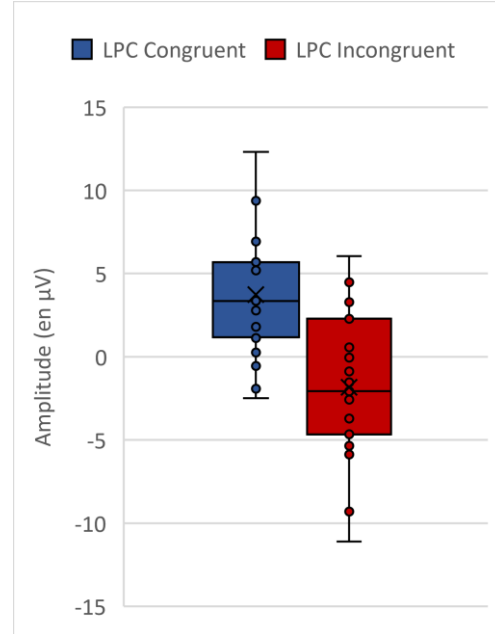


Figure 42. Amplitudes moyennes de la réponse LPC pour les conditions congruentes et incongruentes.

4.3.6. Potentiels évoqués par la séquence oddball-omission tactile

4.3.6.1. Suppression par répétition

Les moyennes des potentiels évoqués par les essais standards du début (familiarisation) et de la fin (contrôle) de séquence de stimulation tactile sont présentées en figure 43 pour la région somatosensorielle et la région fronto-centrale. La distribution des données suit une loi normale en région somatosensorielle pour la condition familiarisation ($W = 0,978$; $p = 0,845$) et pour la condition contrôle ($W = 0,981$; $p = 0,905$) et en région fronto-centrale pour la condition familiarisation ($W = 0,961$; $p = 0,425$) et pour la condition contrôle ($W = 0,977$; $p = 0,821$). Nous avons donc effectué des tests t de Student pour échantillons appariés. Nous avons mis en évidence une amplitude significativement réduite de la réponse N140 en région somatosensorielle en phase contrôle par rapport à la familiarisation ($t(24) = -5,93$; $p < 0,001$; d de Cohen = $-1,19$; Figure 44), de même pour la P300 en région fronto-centrale ($t(24) = 5,31$; $p < 0,001$; d de Cohen = $1,06$; Figure 45).

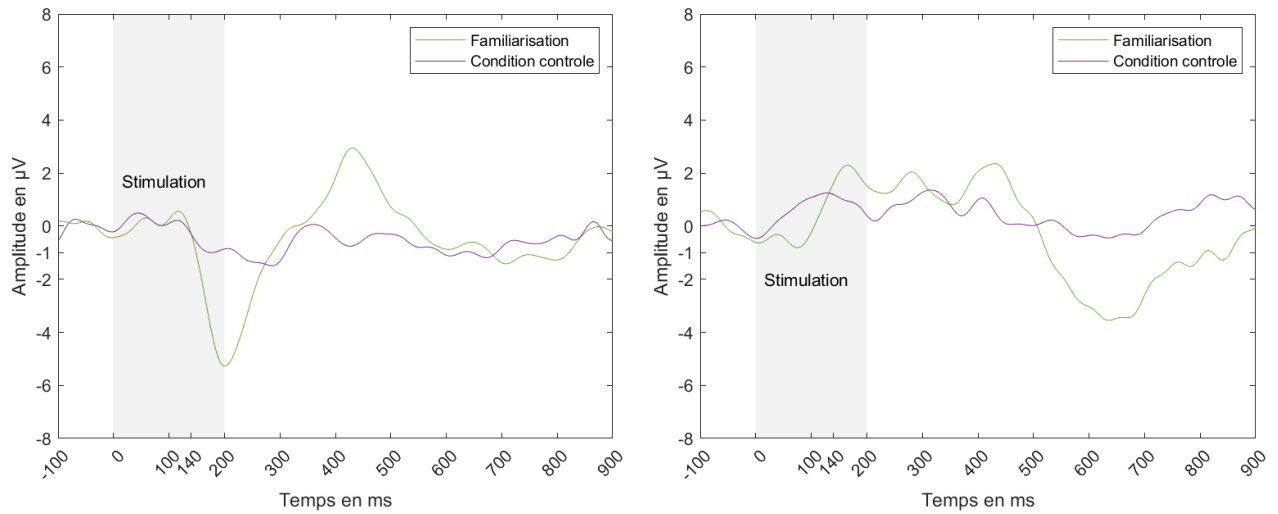


Figure 43. Moyennes des potentiels évoqués entre le début de séquence tactile (familiarisation) et la fin de séquence tactile (condition contrôlée) en région somatosensorielle (gauche) et en région fronto-centrale (droite).

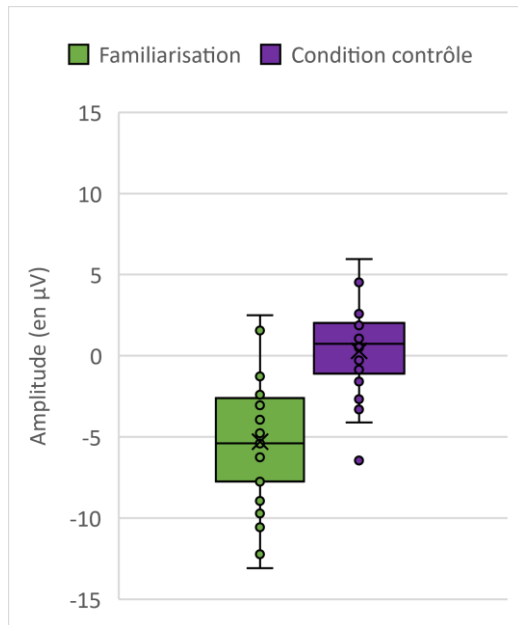


Figure 44. Amplitudes moyennes de la réponse P300 pour la condition familiarisation et la condition contrôlée en région fronto-centrale.

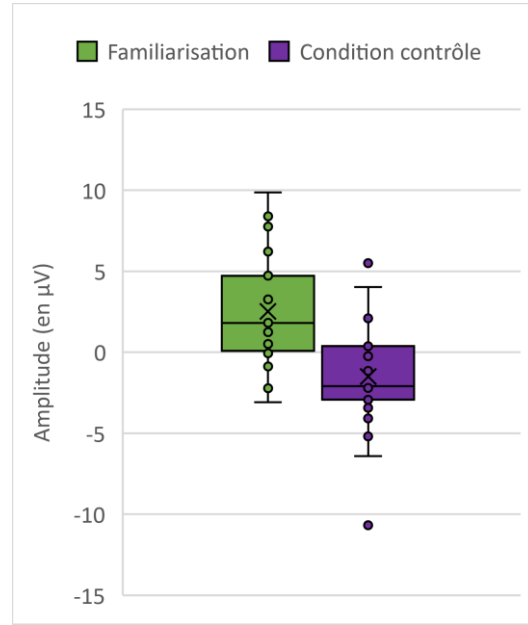


Figure 45. Amplitudes moyennes de la réponse N140 pour la condition familiarisation et la condition contrôlée en région somatosensorielle.

4.3.6.2. Réponses à la déviance et à la post-omission

Les potentiels évoqués moyens lors de stimuli standards et déviants en région somatosensorielle et en région fronto-centrale sont présentées en Figure 46. La distribution amplitudes de la N140 suivait une loi normale pour la condition stimuli standards ($W = 0,973$; $p = 0,729$) et pour la condition stimuli déviants ($W = 0,958$; $p = 0,377$). La distribution des amplitudes de la P300 suivait une loi normale pour la condition stimuli standards ($W = 0,933$; $p = 0,102$) et pour la condition stimuli déviants ($W = 0,945$; $p = 0,188$). Nous avons mis en

évidence une amplitude significativement plus élevée de la N140 évoquée par les déviants par rapport aux standards ($t(24) = 9,47$; $p < 0,001$; d de Cohen = 1,89 ; Figure 47) et de même pour la P300 ($t(24) = -6,04$; $p < 0,001$; d de Cohen = -1,21 ; Figure 48).

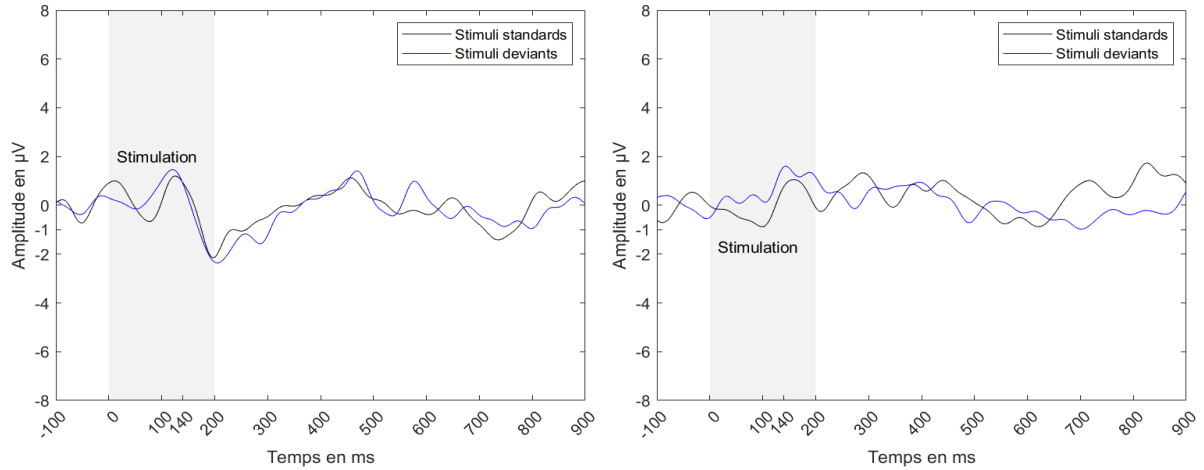


Figure 46. Moyenne des potentiels évoqués par les stimuli standards et les stimuli déviants en région somatosensorielle (gauche) et en région fronto-centrale (droite).

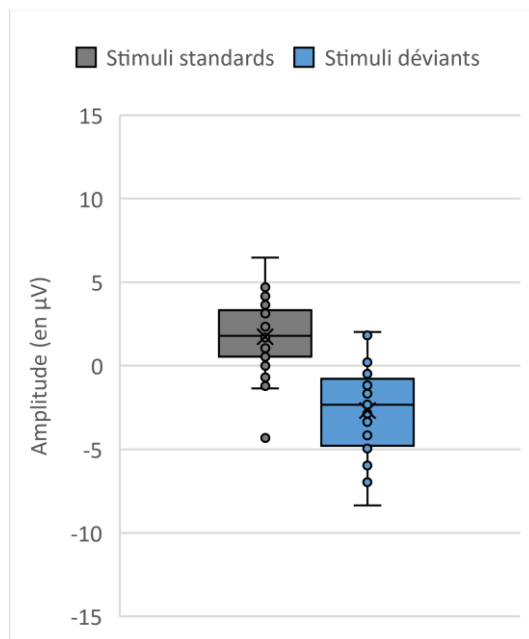


Figure 47. Amplitudes moyennes de la réponse N140 pour la condition stimuli standards et la condition stimuli déviants en région somatosensorielle.

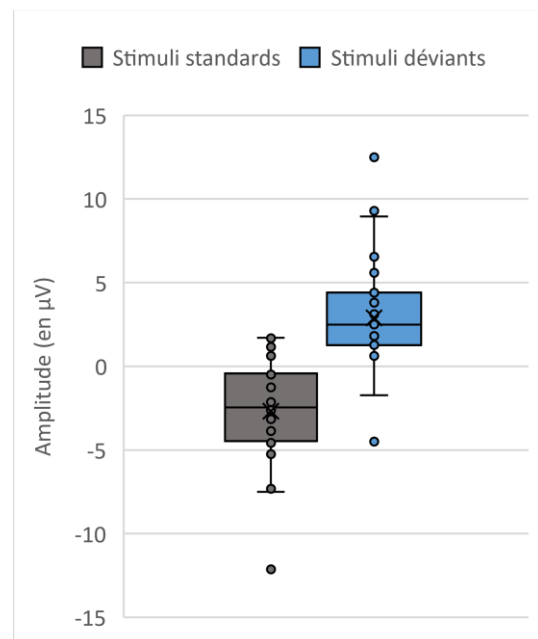


Figure 48. Amplitudes moyennes de la réponse P300 pour la condition stimuli standards et la condition stimuli déviants en région fronto-centrale.

Les potentiels évoqués moyens lors des stimuli présentés juste après une omission (post-omissions) sont présentés en Figure 49 pour la région somatosensorielle et la région fronto-centrale. La distribution des amplitudes de la N140 évoquée par les post-omissions suit une loi normale ($W = 0,972$; $p = 0,685$) de même que celle des amplitudes de la P300 ($W = 0,926$; $p = 0,069$). Nous avons mis en évidence une amplitude de la N140 significativement plus élevée

lors des post-omissions que lors des standards ($t(24) = -6,12$; $p < 0,001$; d de Cohen = $-1,22$; Figure 50), de même pour la P300 ($t(24) = 5,18$; $p < 0,001$; d de Cohen = $1,06$; Figure 51).

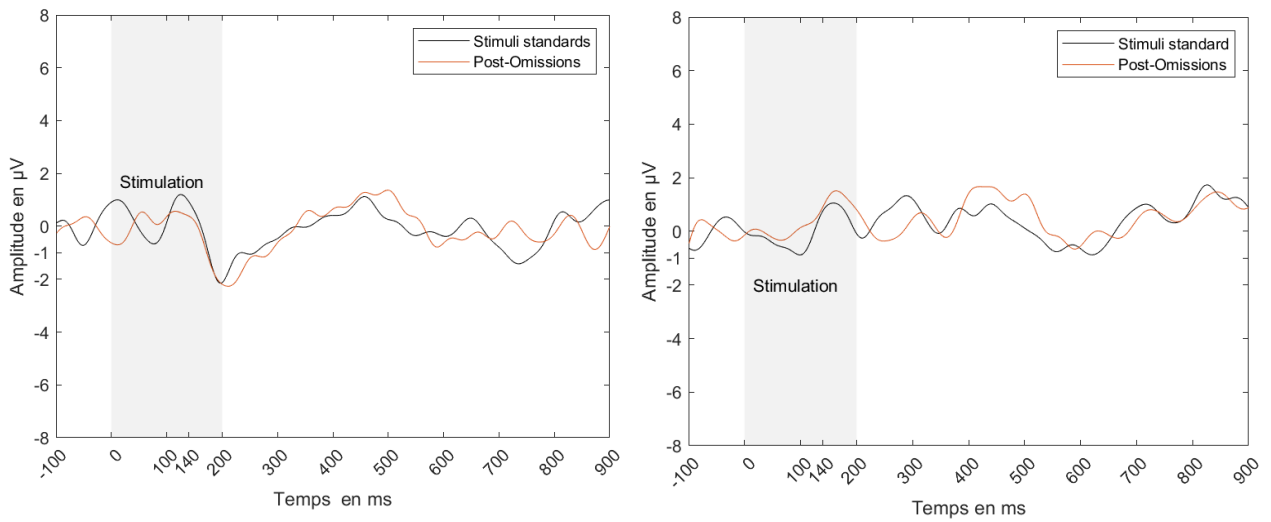


Figure 49. Moyenne des potentiels évoqués par les conditions stimuli standards et les stimuli post-omission en région somatosensorielle (gauche) et en région fronto-centrale (droite).

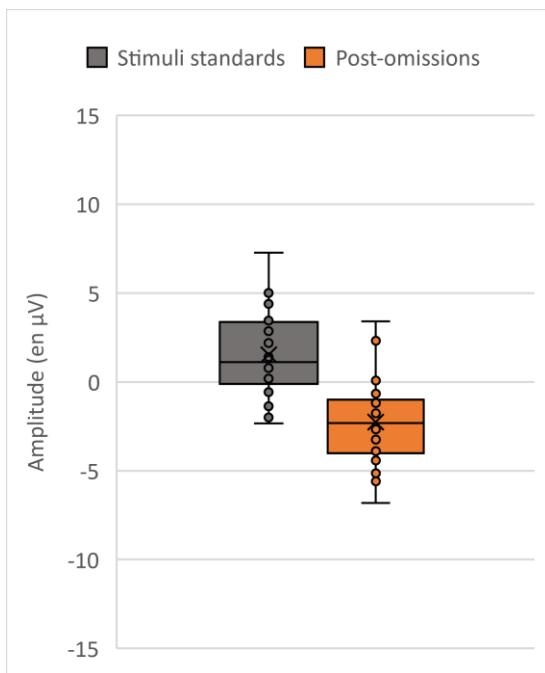


Figure 50. Amplitudes moyennes de la réponse N140 pour la condition stimuli standards et la condition post-omissions en région somatosensorielle.

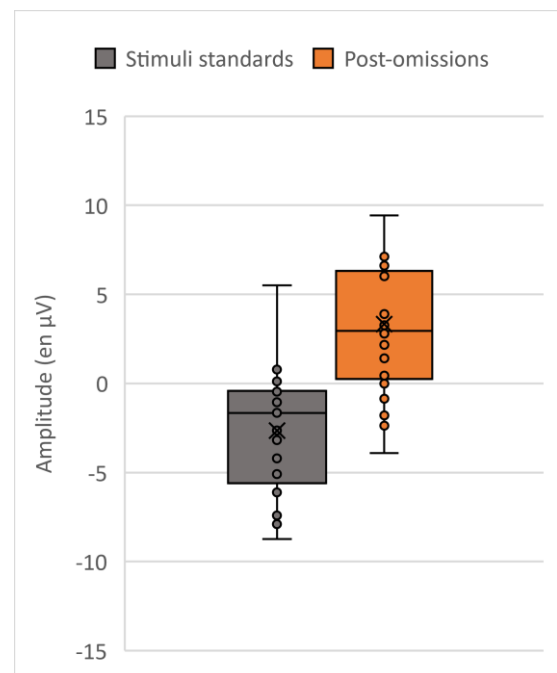


Figure 51. Amplitudes moyennes de la réponse P300 pour la condition stimuli standards et la condition stimuli déviants en région fronto-centrale.

4.3.7. *Liens entre les corrélats neurophysiologiques de l'attention exécutive et du traitement tactile*

Afin de calculer les coefficients de corrélation entre les réponses cérébrales associées à l'attention exécutive et celles associées au traitement tactile, nous avons d'abord extrait les différences d'amplitudes entre les conditions comparées pour chaque mesure. Ces différences seront par la suite appelées « réponse au conflit » pour la différence d'amplitude entre les conditions (incongruente – congruente) de la *Preschool-ANT*, « suppression par répétition » pour la différence d'amplitude entre les stimuli du début et de la fin (familiarisation – contrôle) de la séquence tactile et « valeurs de *mismatch* » pour la différence d'amplitude entre les conditions (déviant - standard et post-omission – standard) du traitement tactile.

Concernant les réponses au conflit de la réponse N2, une plus forte différence négative entre les conditions congruentes et incongruentes de la *Preschool-ANT*, signale une plus forte réponse au conflit. Concernant les réponses au conflit des LPC, bien que ce soit des réponses positives, une différence est attendue dans le sens négatif, puisque l'amplitude des LPC est attendue plus ample en condition congruente qu'en condition incongruente (Abundis-Gutiérrez et al., 2014; Rueda, Posner, et al., 2004).

Une forte suppression par répétition de la réponse N140, est caractérisée par une forte différence négative entre les réponses obtenues en phase de familiarisation, auxquelles on soustrait celles obtenues en phase contrôle. Une forte suppression par répétition de la réponse P300 à l'inverse, est caractérisée par une forte différence positive.

Concernant les valeurs de *mismatch* de la réponse N140 entre les conditions du protocole tactile (déviant - standard et post-omission – standard), une plus forte différence négative signale une erreur de prédiction. Le pattern inverse est attendu concernant les valeurs de *mismatch* de la réponse P300 : une plus forte différence positive signale le traitement de haut niveau d'une erreur de prédiction.

Ce sont ces valeurs qui sont utilisées pour les analyses corrélationnelles présentées dans les Tableaux 12, 13 et 14.

- Relation entre la réponse au conflit et la suppression par répétition tactile

Nous avons mis en évidence une corrélation négative entre la réponse au conflit des LPC lors de la *Preschool-ANT* et la suppression par répétition de la P300 lors de la séquence tactile ($\rho = -0,473$; $p = 0,028$; Tableau 12 et Figure 52). Or, la réponse au conflit étant calculée

en soustrayant la valeur en condition congruente à la valeur en condition incongruente, alors que les LPC sont plus amples en condition congruente, la réponse au conflit est négative pour les LPC. Autrement dit, plus l'activité fronto-centrale est atténuée au cours des répétitions tactiles, plus la réponse au conflit y est élevée.

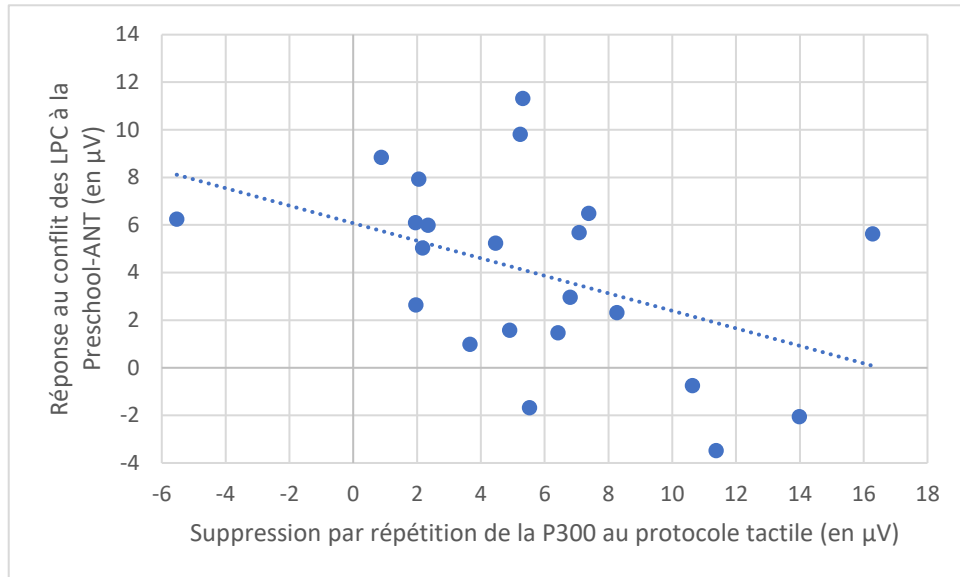


Figure 52. Relation entre la réponse au conflit des LPC à la *Preschool-ANT* et la suppression par répétition de la P300 au protocole tactile.

- Relation entre la réponse au conflit et la *mismatch* liée à la déviance tactile

Nous n'avons pas observé de corrélation significative (Tableau 12).

- Relation entre la réponse au conflit et la *mismatch* liée aux post-omissions tactiles

Nous avons mis en évidence une corrélation négative entre la réponse au conflit des LPC lors de la *Preschool-ANT* et la valeur de *mismatch* de la N140 ($\rho = -0,503$; $p = 0,018$; Tableau 12 et Figure 53). Autrement dit, plus l'activité somatosensorielle est augmentée par un stimulus tactile présenté à la suite d'une omission, plus la réponse au conflit fronto-centrale est élevée.

On note également une corrélation positive entre la suppression par répétition de la P300 lors de la séquence tactile et la valeur de *mismatch* de la P300 ($\rho = 0,398$; $p = 0,049$; Tableau 12). Autrement dit, plus la P300 est atténuée au cours de répétitions tactiles identiques, plus elle est augmentée par un stimulus tactile déviant, ce qui est attendu puisque les deux résultent d'une meilleure modulation de l'activité liée au traitement de haut niveau des stimuli.

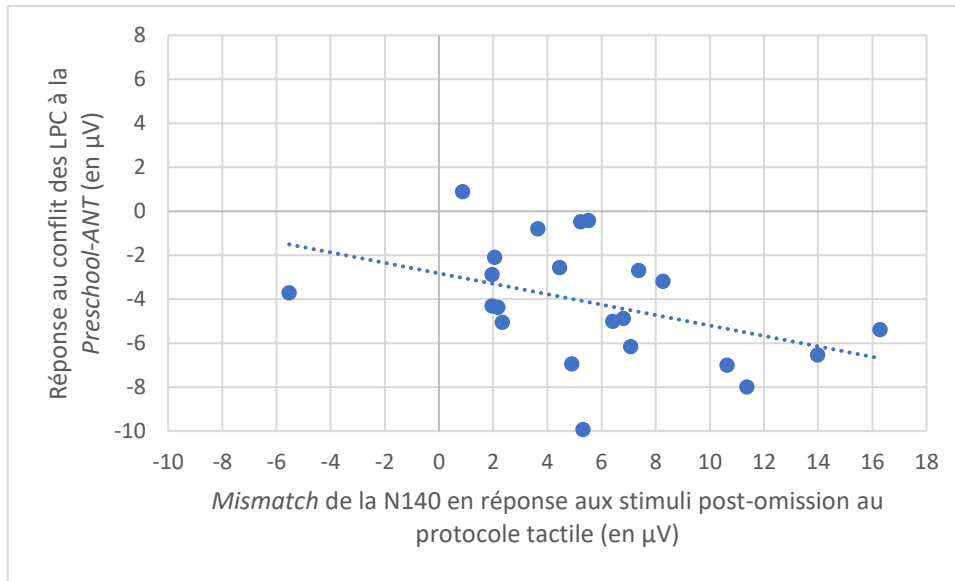


Figure 53. Relation entre la réponse au conflit des LPC à la *Preschool-ANT* et la *mismatch* de la N140 liée aux post-omissions tactiles.

Tableau 12. Tableau récapitulatif des corrélations entre corrélats neurophysiologiques de la *Preschool-ANT* et du protocole *oddball*-omission tactile : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs *p* associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules en jaunes correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude.

| | | <i>Preschool-ANT</i> | | Protocole <i>oddball</i> -omission tactile | | | | | |
|--|------------------------|----------------------|---------------|--|--------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | Conflit N2 | Conflit LPC | SR N140 | SR P300 | Mismatch N140 déviance | Mismatch P300 déviance | Mismatch N140 post-om | Mismatch P300 post-om |
| <i>Preschool-ANT</i> | Conflit N2 | - | 0,604 | 0,621 | 0,551 | 0,904 | 0,445 | 0,844 | 0,582 |
| | Conflit LPC | -0,108 | - | 0,469 | 0,028 | 0,378 | 0,687 | 0,018 | 0,151 |
| Protocole <i>oddball</i> -omission tactile | SR N140 | 0,111 | 0,162 | - | 0,858 | 0,169 | 0,170 | 0,893 | 0,250 |
| | SR P300 | 0,134 | -0,473 | -0,038 | - | 0,086 | 0,049 | 0,76 | 0,284 |
| | Mismatch N140 déviance | -0,028 | -0,197 | -0,284 | 0,351 | - | 0,899 | 0,099 | 0,250 |
| | Mismatch P300 déviance | 0,171 | -0,091 | -0,283 | 0,398 | -0,027 | - | 0,937 | 0,303 |
| | Mismatch N140 post-om | 0,045 | -0,503 | 0,028 | 0,226 | 0,338 | 0,017 | - | 0,055 |
| | Mismatch P300 post-om | 0,124 | 0,317 | 0,238 | 0,222 | -0,238 | 0,214 | -0,390 | - |

4.3.8. Relation entre les corrélats neurophysiologiques du traitement tactile et l'attention exécutive en contexte

Nous avons mis en évidence une corrélation positive entre la suppression par répétition de la N140 au cours de stimuli tactiles répétés et le score composite exécutif global obtenu à la BRIEF-P ($\rho = 0,511$; $p = 0,009$; Tableau 14 et Figure 54). Cette corrélation était également présente au sein de deux sous-échelles de la BRIEF-P, l'inhibition ($\rho = 0,513$; $p = 0,009$) et la planification ($\rho = 0,440$; $p = 0,028$). Autrement dit, plus l'activité somatosensorielle est atténuée au cours de la répétition des stimuli tactiles, plus les parents rapportent un bon fonctionnement exécutif en vie quotidienne, d'autant plus en ce qui concernant l'inhibition et la planification.

Nous avons également observé une corrélation négative entre la valeur de *mismatch* de la N140 et l'échelle de contrôle émotionnel à la BRIEF-P ($\rho = -0,477$; $p = 0,016$; Figure 55). Autrement dit, plus l'activité somatosensorielle est augmentée par un stimulus tactile déviant, plus les parents rapportent de difficultés de contrôle émotionnel.

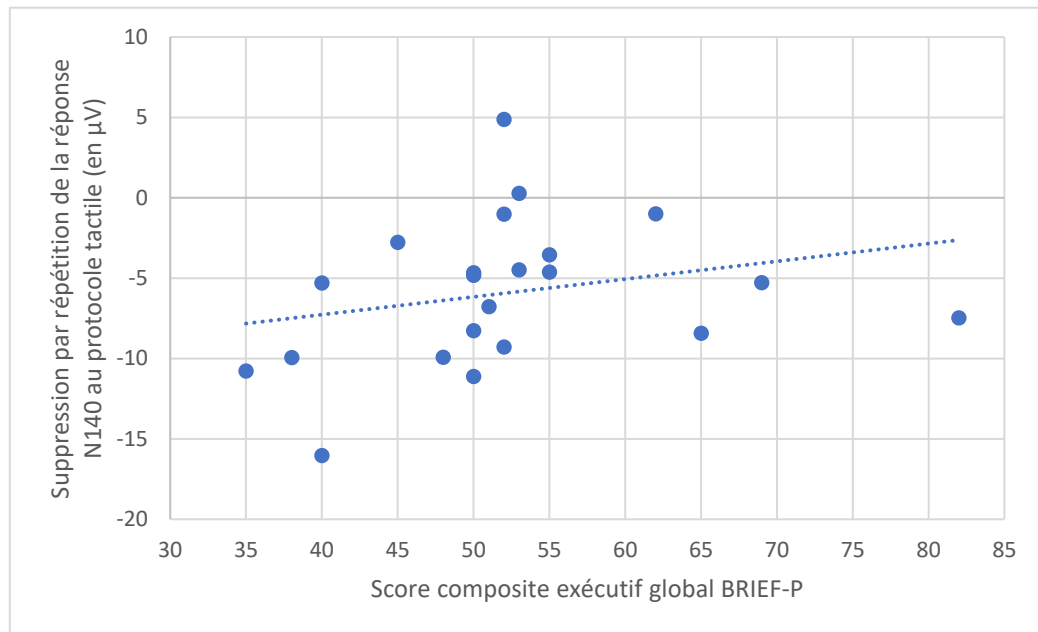


Figure 54. Relation entre suppression par répétition de la réponse N140 au protocole tactile et score composite exécutif global de la BRIEF-P.

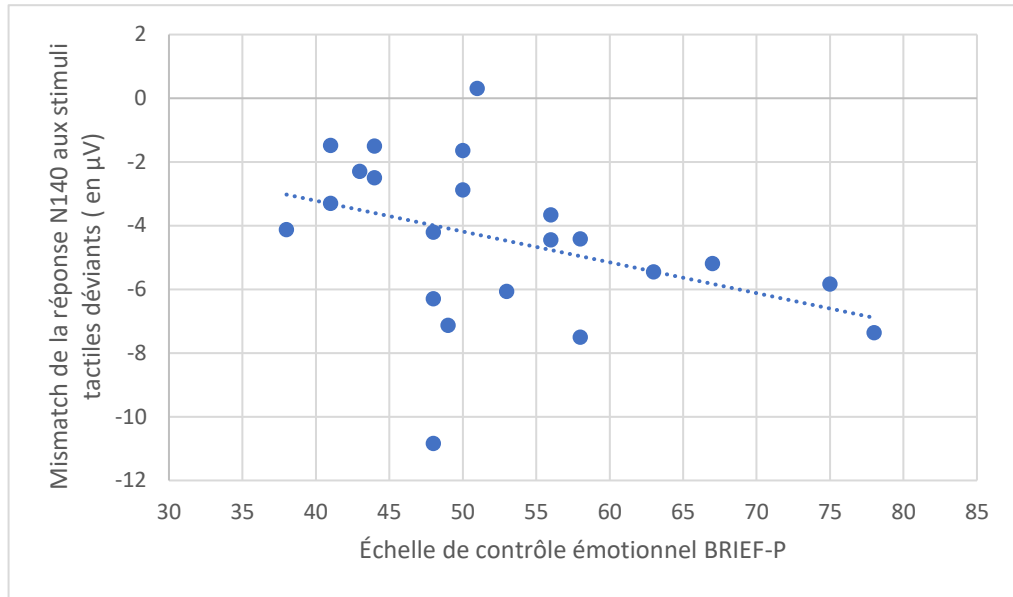


Figure 55. Relation entre *mismatch* de la réponse N140 aux stimuli tactiles déviants et l'échelle de contrôle émotionnel de la BRIEF-P.

4.3.9. *Relation entre les corrélats neurophysiologiques de l'attention exécutive et les scores obtenus au PSD*

Nous n'avons pas observé de corrélation significative (Tableau 13).

Tableau 13. Tableau récapitulatif des corrélations de Spearman entre les corrélats neurophysiologiques de l'attention exécutive et les scores obtenus au PSD : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs *p* associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules jaunes correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude.

| | | <i>Preschool-ANT</i> | | |
|----------------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|
| | | Conflit N2 | Conflit LPC | Tactile PSD |
| <i>Preschool-ANT</i> | Conflit N2 | - | <i>0,836</i> | <i>0,102</i> |
| | Conflit LPC | -0,044 | - | <i>0,281</i> |
| | Tactile PSD | <i>0,626</i> | <i>0,224</i> | - |

Chapitre 4 – Contributions expérimentales

Tableau 14. Tableau récapitulatif des corrélations de Spearman entre les corrélats neurophysiologiques du traitement tactile et l'attention exécutive en contexte : dans la partie inférieure, les coefficients Rho de Spearman sont indiqués et dans la partie supérieure, les valeurs p associées sont indiquées. Les corrélations statistiquement significatives sont surlignées en gras. Les cellules jaunes correspondent aux hypothèses formulées dans l'étude.

| | | Protocole <i>oddball</i> -omission tactile | | | | | | BRIEF-P | | | | | |
|--|------------------------|--|--------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------|---------------------|------------------|------------------|
| | | SR N140 | SR P300 | Mismatch N140 déviance | Mismatch P300 déviance | Mismatch N140 post-om | Mismatch P300 post-om | Score exécutif global | Inhibition | Flexibilité | Contrôle émotionnel | MDT | Planification |
| Protocole <i>oddball</i> -omission tactile | SR N140 | - | 0,858 | 0,169 | 0,170 | 0,893 | 0,250 | 0,009 | 0,009 | 0,633 | 0,546 | 0,104 | 0,028 |
| | SR P300 | -0,038 | - | 0,086 | 0,049 | 0,276 | 0,284 | 0,796 | 0,861 | 0,551 | 0,711 | 0,239 | 0,295 |
| | Mismatch N140 déviance | -0,284 | 0,351 | - | 0,899 | 0,099 | 0,250 | 0,516 | 0,135 | 0,258 | 0,016 | 0,572 | 0,872 |
| | Mismatch P300 déviance | -0,283 | 0,398 | -0,027 | - | 0,937 | 0,303 | 0,846 | 0,282 | 0,904 | 0,574 | 0,831 | 0,786 |
| | Mismatch N140 post-om | 0,028 | 0,226 | 0,338 | 0,017 | - | 0,055 | 0,780 | 0,920 | 0,163 | 0,415 | 0,705 | 0,744 |
| | Mismatch P300 post-om | 0,238 | 0,222 | -0,238 | 0,214 | -0,390 | - | 0,462 | 0,462 | 0,479 | 0,354 | 0,971 | 0,257 |
| BRIEF-P | Score exécutif global | 0,511 | 0,055 | -0,136 | -0,041 | 0,059 | 0,154 | - | <0,001 | 0,033 | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| | Inhibition | 0,513 | 0,037 | -0,307 | -0,224 | 0,021 | 0,154 | 0,882 | - | 0,366 | <0,001 | 0,002 | 0,003 |
| | Flexibilité | 0,100 | -0,125 | -0,235 | 0,025 | -0,288 | 0,148 | 0,404 | 0,178 | - | 0,452 | 0,095 | 0,127 |
| | Contrôle émotionnel | 0,127 | 0,078 | -0,477 | 0,118 | 0,170 | 0,194 | 0,588 | 0,672 | 0,148 | - | 0,184 | 0,104 |
| | MDT | 0,333 | 0,244 | 0,119 | 0,045 | 0,080 | 0,008 | 0,788 | 0,559 | 0,322 | 0,529 | - | <0,001 |
| | Planification | 0,440 | 0,218 | 0,034 | -0,057 | -0,069 | 0,236 | 0,726 | 0,545 | 0,295 | 0,314 | 0,823 | - |

Note : GEC = Score composite exécutif global ; MDT = mémoire de travail

4.4. Discussion

L'objectif principal de cette deuxième étude était de comparer les composantes de l'activité neuronale associées à la mise en œuvre de l'attention exécutive dans la *Preschool-ANT* avec celles évoquées par différentes conditions sollicitant la prédiction sensorielle dans la modalité tactile du paradigme *oddball*-omission. Nous souhaitons également comparer les corrélats neurophysiologiques de l'une avec les évaluations comportementales de l'autre (corrélats neurophysiologiques de la prédiction tactile avec questionnaire parental des fonctions exécutives, et inversement).

Avant d'adresser nos objectifs principaux, nous souhaitons au préalable évaluer la réplication, avec ce nouveau jeu de données, des résultats obtenus dans l'étude précédente. Tout comme dans l'étude 1A, plus les parents rapportent des fonctions exécutives efficaces en contexte, plus ils rapportent un traitement tactile efficace en situation de vie quotidienne. Concernant les performances comportementales, les corrélations de l'étude 2 reproduisent partiellement celles de l'étude 1B. Les temps de réaction médians sont significativement plus élevés en condition incongruente qu'en condition congruente à la *Preschool-ANT*. Les enfants qui commettent le plus d'erreurs à la *Preschool-ANT* sont ceux qui ont les plus faibles scores à l'HTKS partie 1 et qui commettent le plus d'erreurs en condition incongruente au Stroop. Ces corrélations semblent robustes sur un plus petit échantillon et malgré la variabilité présente dans nos échantillons.

Les contributions expérimentales de cette deuxième étude apportent de nouveaux éléments sur les marqueurs neuronaux liés au développement de l'attention exécutive. Nous avons mis en évidence une modulation de la réponse N2 entre 300 et 550 ms post-stimuli en région fronto-centrale en fonction de la congruence des *flankers*, avec une amplitude plus ample en condition incongruente. Ceci indique le traitement du conflit cognitif dans la condition incongruente dès l'âge de 4 ans. Dans deux études utilisant la *Child-ANT*, les auteurs mettent en évidence un effet de conflit concernant la modulation de l'amplitude de la réponse N2 chez des enfants de 4 ans en région fronto-centrale à partir de 500ms post-stimuli (Abundis-Gutiérrez et al., 2014; Rueda, Posner, et al., 2004). Notre travail complète ces résultats, dans la mesure où nous apportons une preuve supplémentaire de la mise en œuvre de l'attention exécutive dès l'âge de 4 ans, et ce en incluant de la variabilité développementale, ce qui n'avait pas encore été investigué.

Nous mettons également en évidence une modulation des LPC en région fronto-centrale par la congruence entre 700 et 1000ms post stimuli, cette fois avec une amplitude plus élevée

en condition congruente. De tels résultats sont également rapportés dans l'étude de Rueda et collaborateurs (2004) et l'étude d'Abundis-Gutiérrez et collaborateurs (2014), mais une activation plus ample de ces composantes en condition congruente chez de jeunes enfants reste peu documenté dans la littérature. Dans les conditions incongruentes, le contrôle inhibiteur est davantage sollicité, pouvant expliquer des réponses N2 plus amples, tandis que dans les conditions congruentes, il l'est moins, mais le contrôle attentionnel doit être maintenu pour parvenir à réaliser l'ensemble de la tâche, d'où des réponses LPC plus amples en condition congruente. De tels résultats soutiennent la réactualisation du modèle de Posner sur le réseau exécutif (Petersen et Posner, 2012). Le contrôle exécutif descendant (*top-down*) serait assuré à la fois par le réseau préfrontal dorsolatéral, qui interviendrait dans l'initiation de la tâche et ses ajustements en temps réel, tandis que le réseau cingulo-operculaire interviendrait dans le maintien attentionnel tout au long de la tâche.

Nous avons utilisé pour la première fois une mesure de l'activité neuronale liée au traitement tactile dans plusieurs conditions sollicitant la prédiction sensorielle, chez des enfants d'âge préscolaire. Nous avons mis en évidence une suppression par répétition des composants précoces (N140) en région somatosensorielle et tardifs (P300) en région fronto-centrale chez des enfants âgés de 4 ans à 4 ans 11 mois. Ils sont capables d'extraire la régularité physique et temporelle des informations tactiles pour en former un modèle mental. Les stimuli déviants physiquement ou temporellement sont ensuite comparés à ce modèle. En effet, nos résultats mettent en évidence une MMN somatosensorielle lorsque les stimuli sont déviants ou suivent une omission, indiquant l'erreur de prédiction. Ils montrent également une augmentation de la P300 en région fronto-centrale, résultant de l'activation de processus de traitement attentionnels ou de plus haut niveau. Ces données sont nouvelles et ce protocole fait l'objet d'une valorisation par ailleurs. Dans le cadre de cette thèse, il nous a permis de comparer les corrélats neurophysiologiques de la prédiction tactile avec ceux de l'attention exécutive.

Lors de ces comparaisons, nous n'avons pas observé de lien de la composante N2 lors du conflit cognitif sollicitant l'attention exécutive durant la *Preschool-ANT* et les corrélats neurophysiologiques du traitement tactile. En revanche, la modulation des LPC semble liée à la modulation de la réponse aux stimuli tactiles. D'une part, plus la suppression par répétition de la P300 est élevée, plus la réponse au conflit des LPC est élevée, réponse associée au maintien du contrôle attentionnel. La réponse P300 est fréquemment associée au niveau d'attention implémenté dans le traitement de stimuli sensoriels (Riggins et Scott, 2020). Nous n'avons pas investigué les liens entre l'attention d'orientation (sollicitée par les variations

d'indices spatiaux) et le traitement sensoriel tactile dans ce travail de thèse, mais ceci pourrait être une piste d'exploration pertinente pour mieux cerner les liens entre les réponses attentionnelles dans les deux protocoles. D'autre part, plus la MMN en région somatosensorielle est élevée dans la condition post-omission, plus la réponse au conflit des LPC est élevée. Ce résultat suggère que la détection de bas niveau de la déviance tactile est elle aussi en lien avec le maintien du contrôle attentionnel. Nous n'avons pas observé le même lien pour la MMN en condition de déviance physique, mais il faut souligner que la perception consciente de cette déviance est très difficile pour les sujets, contrairement à la déviance temporelle créée par l'omission. Cette déviance physique pourrait donc être trop subtile pour engendrer une MMN suffisante pour les besoins de notre étude.

La suppression par répétition de la P300 ne semble pas liée aux fonctions exécutives en contexte, contrairement à ce que ses liens avec l'amplitude des LPC pouvait laisser supposer. À l'inverse, c'est la suppression par répétition de la N140 somatosensorielle qui est positivement liée au score composite exécutif global de la BRIEF-P, et également les échelles d'inhibition et de planification. Ces scores étant élevés lorsque l'enfant présente des difficultés, cela suggère qu'une forte suppression des composants de bas niveau est associée à plus de difficultés exécutives. Ce résultat est en faveur de propositions récemment faites dans la littérature, suggérant la suppression par répétition comme un précurseur de l'inhibition comportementale (Nordt et al., 2016). Ce mécanisme adaptatif, permet au cerveau de gérer efficacement les informations sensorielles qui lui parviennent, en laissant plus de ressources cognitives disponibles pour la planification et la mise en œuvre de comportements orientés vers un but (Schubotz, 2015). Dans nos données, la suppression des composants de bas niveau est donc associée à plus de difficultés en contexte, sans lien apparent avec la réponse cérébrale au conflit, tandis que la MMN et la suppression de composants de haut niveau sont associés à la modulation des réponses de haut niveau à la tâche exécutive, sans lien apparent avec les fonctions en contexte. Ces résultats soutiennent l'idée d'un lien entre traitement tactile et attention exécutive, mais mettent aussi en avant une dissociation entre les processus attentionnels en situation de tâche contrôlée et ceux en situation écologique.

Les traitements tactiles de bas niveaux semblent jouer sur d'autres aspects du fonctionnement exécutif que ceux sollicités par des paradigmes comme l'ANT. Le traitement intermédiaire caractérisé par la MMN est quant à lui lié à la fois à la modulation des LPC lors de la tâche, mais aussi négativement corrélé à l'indice de contrôle émotionnel de la BRIEF-P. Il faut rester prudent car il s'agit de MMN dans deux conditions différentes (post-omission et

déviance, respectivement), et notre travail exploratoire n'implique pas de correction pour corrélations multiples, rendant probable les résultats significatifs fortuits. Des travaux ultérieurs devront donc s'attacher à tester plus spécifiquement les liens que nos résultats suggèrent. Si ces résultats s'avéraient robustes, il faudrait approfondir les mécanismes par lesquels la détection de l'erreur dans les entrées tactiles est liée d'un côté à l'attention exécutive, de l'autre au contrôle émotionnel. Être en capacité de contrôler ses pensées et ses émotions est une dimension qui est prise en compte dans l'attention exécutive, par le contrôle de l'effort. Décrit par Mary Rothbart, le contrôle de l'effort est associé à la dimension de tempérament et son efficacité permet à l'enfant de s'auto-réguler (Rothbart et Rueda, 2005). Les systèmes de contrôle de l'effort sont cruciaux durant la période préscolaire, et favorisent ultérieurement le degré de maîtrise de soi par la compréhension de l'empathie, du sentiment de honte et de culpabilité (Eisenberg et al., 1994).

Enfin, la suppression des composants de haut niveau du traitement tactile sont associés à une plus ample réponse fronto-centrale à la tâche, mais il est difficile de dire si ceci traduit une meilleure efficacité de l'attention exécutive, comme nous le supposons, car le sens de la modulation des LPC lors de la tâche par rapport aux performances en vie quotidienne restent à démontrer. Afin de tenter de répondre à cette limite, la prochaine étape du travail devra donc s'attacher à exploiter les données de performances à la *Preschool-ANT* (temps de réaction et erreurs) dans une approche en régressions multiples, afin de modéliser les liens entre corrélats neurophysiologiques, performances comportementales à la tâche, et performances en contexte. Une fois les liens entre ces éléments élucidés, l'effet du traitement tactile pourrait être plus facilement interprété.

Cette étude confirme que le traitement tactile est lié à certains aspects de l'attention exécutive, et souligne la pertinence d'identifier les liens entre le déploiement de l'attention exécutive et les mécanismes de traitement de l'information sensorielle tactile. Elle souligne le potentiel d'une compréhension des précurseurs sensoriels des trajectoires développementales, mais elle suggère aussi à quel point l'attention exécutive est un construit complexe, multi-niveaux, pour lequel nous ne disposons pas encore de mesure satisfaisante permettant d'en étudier tous les aspects. Notre travail ouvre la voie vers de nouveaux paradigmes de recherche visant à identifier des précurseurs cross-syndromiques des trajectoires développementales atypiques.

Résumé du chapitre 4

Deux études composaient ce travail de thèse, visant à identifier des liens entre attention exécutive et traitement sensoriel dans la modalité tactile chez des enfants d'âge préscolaire.

La première étude, menée auprès d'enfants âgés de 4 ans à 5 ans 11 mois, a mis en évidence des liens entre les réponses fournies à la BRIEF-P et au PSD (étude 1A). Ces résultats, fondateurs de notre question de recherche, soulignent des liens en contexte entre fonctions exécutives et traitement sensoriel tactile. Nous avons développé un nouvel outil de mesure de l'attention exécutive adapté à nos âges d'intérêt, la *Preschool-ANT* (étude 1B), basé sur le modèle des réseaux neuronaux de l'attention de Posner et Petersen (1990). Les performances des enfants dans notre tâche, étaient associées aux performances obtenues dans deux tâches évaluant le contrôle inhibiteur, l'HTKS et le Stroop. La *Preschool-ANT* avait pour but de permettre des mesures ultérieures en EEG des liens entre attention exécutive et traitement sensoriel tactile.

La deuxième étude, menée auprès d'enfants âgés de 4 ans à 4 ans 11 mois, incluait des mesures neuronales en EEG conjointement aux mesures décrites dans l'étude 1. Avec la *Preschool-ANT*, nous avons mis en évidence les corrélats neurophysiologiques du conflit cognitif dès 4 ans. En utilisant un nouveau protocole *oddball*-omission tactile, nous avons mis en évidence une suppression par répétition (SR) des réponses somatosensorielle et fronto-centrale, une *mismatch negativity* (MMN) somatosensorielle et une P300 augmentée en région fronto-centrale lors des essais déviants. La SR de la P300 est associée aux réponses positives tardives plus amples à la *Preschool-ANT*, tandis que la SR de la N140 somatosensorielle est corrélée au score exécutif global de la BRIEF-P et à ses indices d'inhibition et de planification. La MMN montre des liens à la fois avec les LPC de la *Preschool-ANT* et le score à l'indice de contrôle émotionnel de la BRIEF-P.

Les résultats soulignent l'intérêt d'étudier les liens entre traitement tactile et attention exécutive malgré les limites inhérentes à cette approche exploratoire.

Chapitre 5

Discussion générale

Chapitre 5 – Discussion générale

Ce travail de thèse avait pour objectif de mettre en évidence les liens entre attention exécutive et traitement sensoriel dans la modalité tactile chez des enfants d'âge préscolaire, un âge auquel les symptômes de développement atypique ne sont pas encore précisément appréciables mais où les premiers signes peuvent apparaître. Pour répondre à cet objectif, nous avons réalisé deux études incluant des enfants aux trajectoires développementales à risques variables, en utilisant des mesures comportementales, puis cérébrales.

Dans une première étude menée auprès de 63 enfants âgés de 4 ans à 5 ans 11 mois, l'objectif était d'ouvrir le champ de nos recherches sur les liens entre et attention exécutive traitement sensoriel tactile en commençant par un premier constat en situation de vie quotidienne. Au travers des réponses fournies par les parents à deux hétéro-questionnaires, nous avons mis en évidence des liens entre l'attention exécutive, par une mesure des fonctions exécutives (BRIEF-P), et le traitement sensoriel tactile (Profil Sensoriel de Dunn), en situation de vie quotidienne. Ce premier résultat indiquait la nécessité d'approfondir davantage ces relations en développant des mesures de performance adaptées à l'âge de nos participants.

Auprès de ce même échantillon d'enfants, nous avons développé une mesure informatisée d'attention exécutive, la *Preschool-ANT*. L'objectif était d'obtenir une mesure d'attention exécutive destinée à des enfants d'âge préscolaire et compatible avec des mesures ultérieures en EEG. Nous avons mis en évidence des performances conformes à ce que la tâche devait évoquer, avec des temps de réaction et des nombres d'erreurs accrus en situation de conflit sollicitant l'attention exécutive. Nous avons également mis en évidence que ces variables étaient corrélées aux performances dans deux autres tâches évaluant le contrôle inhibiteur, le Stroop et l'HTKS.

Dans une deuxième étude, nous avons proposé à 28 enfants âgés de 4 ans à 4 ans 11 mois des mesures en EEG durant la *Preschool-ANT* et un protocole *oddball*-omission dans la modalité tactile, ainsi que les deux mesures comportementales de performance, le Stroop et l'HTKS, et aux parents les hétéro-questionnaires BRIEF-P et Profil Sensoriel de Dunn. L'objectif était de mettre en évidence des liens entre l'activité neuronale liée à la mise en œuvre de l'attention exécutive et celle impliquée dans le traitement sensoriel tactile. Nous avons montré une modulation de l'activité cérébrale fronto-centrale entre les conditions congruentes et incongruentes de la *Preschool-ANT*. Avec le protocole *oddball*-omission, nous avons montré des capacités de suppression par répétition (SR) et de prédiction sensorielle dans la modalité tactile, ce qui n'avait pas encore été caractérisé dans la littérature chez des enfants de 4 ans.

Enfin, nous rapportons des corrélations entre les corrélats neurophysiologiques des deux tâches. Une plus grande suppression de la P300 fronto-centrale au cours des répétitions de stimuli tactiles était associée à des différences de LPC plus amples entre les conditions congruentes et incongruentes de la *Preschool-ANT*. Cependant, la SR de la N140 en région somatosensorielle n'était pas liée aux activités cérébrales évoquée par la tâche attentionnelle, elle était corrélée au score composite exécutif global de la BRIEF-P et à ses échelles d'inhibition et de planification. La capacité du cerveau des enfants de 4 ans à réduire le traitement de stimuli répétés semble donc bien liée à leurs capacités d'attention exécutive, mais par des mécanismes différents pour les traitements de bas et de haut niveau. Enfin, la MMN, composante intermédiaire du traitement de la déviance dans la stimulation tactile, montrait des liens à la fois avec les LPC de la *Preschool-ANT* et l'échelle de contrôle émotionnel de la BRIEF-P.

Notre travail présente certaines limites en raison de son caractère exploratoire. Le nombre élevé de variables au regard de l'échantillon ne soutiendrait pas une correction pour corrélations multiples, et il sera donc nécessaire de tester plus avant les relations que nos résultats suggèrent. Toutefois, nous montrons l'intérêt des liens entre le traitement sensoriel dans la modalité tactile, un élément très précoce du neurodéveloppement, et le développement de l'attention exécutive, un paramètre crucial dans l'évaluation du développement cognitif des enfants et de leur réussite scolaire et sociale.

De nombreuses pistes sont à explorer pour approfondir ce travail. Tout d'abord, l'étude des performances à la tâche *Preschool-ANT* des enfants de l'étude 2 est nécessaire pour décrire comment s'articulent les corrélats neurophysiologiques et les performances en situation contrôlée. Ceci éclairerait sur les relations que nous observons entre ces mesures cérébrales et les performances en vie quotidienne d'une part, et avec les mesures sensorielles d'autre part. Ensuite, nous devons prendre en compte la validité des indices spatiaux dans notre tâche *Preschool-ANT* et caractériser leur effet sur l'activité cérébrale, en lien avec le traitement tactile et les autres mesures. Le traitement de la validité des indices est associé à l'attention d'orientation en grandissant, mais nous ne pouvons pas exclure qu'à un si jeune âge il puisse encore être témoin d'une activité du réseau de la saillance, et potentiellement associée au traitement sensoriel dans la modalité tactile.

Le réseau de la saillance joue un rôle majeur dans le traitement de l'information sensorielle, en identifiant les éléments pertinents de l'environnement et en orientant l'attention vers ces derniers. Il est à l'interface entre traitement sensoriel et contrôle cognitif, et des dysfonctionnements de ce réseau sont associés à des trajectoires développementales atypiques. Lorsqu'il est hyperactif, l'individu est constamment sensible aux stimuli environnementaux, qui

peuvent se traduire par des manifestations comportementales d'hyperactivité, présentes dans la symptomatologie du TDA/H ou bien une hypersensibilité sensorielle, présente dans la symptomatologie du TSA. Lorsqu'il est hypoactivé, au contraire l'individu ne prête pas suffisamment attention à des stimuli pertinents, ce qui peut conduire à des manifestations comportementales d'inattention ou bien des difficultés à percevoir les codes sociaux, symptômes fréquemment rapportés dans la symptomatologie du TSA, du TDA/H mais aussi des TDA.

Dans les futurs travaux, il faudra s'attacher à inclure davantage d'enfants présentant des facteurs de risques tels que la naissance prématurée, ou des signes de risque de développement atypique tels que les suivis psychoéducatifs, qui n'ont été que peu étudiés sur des paradigmes de type *flanker task*, que ce soit *via* des mesures comportementales et des mesures cérébrales (Fabio et Urso, 2014; Mutreja et al., 2016). L'approche développementale implique une variabilité importante et donc nécessite des échantillons hétérogènes et de grande taille, mais cela est nécessaire pour saisir comment le traitement sensoriel tactile atypique pourrait être précurseur de troubles du développement cognitifs, et utiliser cette connaissance pour prévenir de tels troubles chez des enfants à risque.

Le statut socio-économique (SES) des enfants, une variable non contrôlée dans notre étude, aurait pu ajouter de la variabilité à nos données, en particulier dans l'étude 2. Les passations se sont déroulées au laboratoire et les participants venaient pour des mesures en EEG, nous ne pouvons pas exclure un biais de recrutement de nos participants. Les parents qui ont fait le déplacement au laboratoire invoquaient tous un intérêt pour la recherche, voire étaient eux-mêmes chercheurs et leurs enfants étaient donc issus de milieux socio-économiques favorisés. Or, de nombreuses études mettent en évidence l'influence du SES sur le développement cognitif précoce, incluant l'attention exécutive. Les enfants provenant de milieux avec un SES plus défavorisé auraient de moins bons résultats académiques et de plus faibles résultats dans des mesures impliquant l'attention exécutive (Fan et al., 2022; Hackman et Farah, 2009; Noble et al., 2015; Raver et al., 2013). Plus récemment, Conejero et collaborateurs (2018) ont étudié les liens entre la variabilité du SES et les modifications de l'activité cérébrale concernant la détection d'erreur chez de jeunes enfants âgés de 16 à 18 mois. Les auteurs ont proposé aux enfants une tâche informatisée de complétion de puzzle composés de parties de corps d'animaux, semblable à la tâche de Stroop animaux avec deux catégories d'erreurs : une erreur conceptuelle, dans laquelle l'une des pièces était erronée (une partie de corps d'un autre animal) et une erreur de position (une orientation différente d'une partie du corps de l'animal présenté). Les auteurs ont étudié en EEG les potentiels évoqués dans les

différentes conditions. Une réponse cérébrale négative liée à l'erreur (MMN) était observée en région fronto-centrale dans les deux conditions, mais elle était moins ample dans le groupe avec un SES moindre, suggérant que le SES peut influencer le développement du réseau de l'attention exécutive. Une réponse cérébrale moins ample, pouvait aussi être due à une représentation initiale des puzzles présentés affaiblie en raison d'une expérience limitée. C'est une variable que nous devrions prendre en compte dans des travaux ultérieurs, en communiquant davantage sur l'intérêt de tels travaux pour la population et en collaborant avec des partenaires comme des maisons de quartiers ou des associations pour inclure les familles éloignées de notre réseau actuel. Les recherches participatives, visant à coconstruire la production des connaissances scientifiques, en encourageant une collaboration entre acteurs de la société civile et chercheurs, pourraient répondre à ce défi.

Notre travail de thèse soulève des préoccupations cliniques concernant la mise en œuvre d'outils de mesure et de prévention concernant l'efficacité de l'attention exécutive et des fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire. En France, si les outils se sont développés ces dernières années pour évaluer les fonctions exécutives chez l'enfant (Roy, 2015), peu d'outils existent pour évaluer l'attention exécutive et les fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire. La batterie FÉE, évaluation comportementale des fonctions exécutives chez les enfants âgés de 6 à 16 ans, est un premier pas vers le déploiement de tels outils en France (Roy et al., 2020). Composée de 12 épreuves ludiques, la batterie permet d'évaluer quatre composantes cognitives centrales : l'inhibition, la mémoire de travail, la flexibilité et la planification. Elle constitue une ressource pour les cliniciens dans l'identification de dysfonctionnements exécutifs chez l'enfant. Il serait pertinent d'étudier dans quelle mesure cette batterie pourrait être adaptée pour des enfants plus jeunes à partir de 4 ans. Bien que de nombreuses tâches se soient déployées dans la recherche pour évaluer ces fonctions chez les plus petits, aucune étude n'a permis de valider une mesure clinique standardisée. La BRIEF-P, questionnaire d'évaluation des fonctions exécutives en contexte, semble être un bon outil prédictif de trajectoires développementales atypiques (Garon et al., 2008; Garon et al., 2016). Cet outil offre la possibilité de croiser les regards entre des milieux différents dans lequel évolue l'enfant, le domicile familial et l'école, mais il est nécessaire de disposer d'outils de test plus directs pour ces jeunes enfants.

Apprendre à contrôler son attention, passe par un contrôle des différentes informations sensorielles qui nous parviennent. Si la sensorialité commence à être davantage investiguée dans les interventions thérapeutiques (Case-Smith et al., 2015), encore peu d'études ont mis en évidence leur efficacité. Dans le champ thérapeutique, l'exploration multisensorielle est au

cœur de l'approche Snoezelen. Il s'agit d'espaces équipés de matériel permettant de créer des expériences multisensorielles contrôlées. Méthode fréquemment employée dans la prise en charge de patients présentant un TSA, peu d'études se sont cependant intéressées à caractériser les apports d'une exploration multisensorielle sur l'évolution des troubles au quotidien (Lotan et Gold, 2009). Une étude menée auprès de 41 enfants âgés de 4 à 12 ans présentant un TSA s'est intéressée à la façon dont le contrôle de l'exploration multisensorielle pouvait influencer les comportements propres à la symptomatologie du trouble (Unwin et al., 2022). L'analyse des données vidéo a mis en évidence que le contrôle des changements sensoriels provoqués dans l'environnement multisensoriel était associé à une attention plus soutenue, une réduction des comportements moteurs répétitifs, de la parole stéréotypée et des vocalisations. Cette étude suggère que le degré de contrôle de l'exploration sensorielle chez des enfants présentant un TND peut favoriser les conditions d'apprentissages.

L'intégration sensorielle peut également bénéficier au développement cognitif d'autres profils d'enfants. Des pédagogies alternatives telles que les pédagogies Montessori considèrent l'éducation sensorielle comme prérequis aux apprentissages fondamentaux (Montessori, 2016). Maria Montessori a conçu du matériel sensoriel spécifique pour encourager l'exploration sensorielle (par exemple, des volumes géométriques ou bien des carrés de textures à explorer tactilement). Bien que cette pédagogie suscite un réel engouement public et qu'elle fasse l'objet de nombreuses études scientifiques depuis ces dernières années, les résultats sont controversés et peu de travaux permettent de conclure de manière claire sur l'efficacité de la pédagogie Montessori (Gentaz et Richard, 2022). Cependant, une récente méta-analyse a recensé sur 33 études menées auprès d'enfants d'âge préscolaire et scolaire les effets de la pédagogie Montessori sur le développement et les apprentissages scolaires (Demangeon et al., 2023). Les résultats mettent en évidence un effet significatif de la pédagogie sur la réussite académique des enfants et leurs compétences sociales. Cette méthode semble d'autant plus pertinente chez les enfants à besoins éducatifs particuliers qui se retrouvent en inclusion scolaire et dont leurs capacités d'intégration sensorielle sont fréquemment altérées (Gkeka et al., 2018; Tam et al., 2017; Vasiļonoks et al., 2018).

Le développement sensoriel joue un rôle fondamental dans le développement cognitif chez l'enfant et ce dès la naissance, voire même dès la conception. Le contact tactile est au cœur des interactions fondamentales permettant une homéostasie physique et psychique. Les interactions tactiles sont par ailleurs fréquemment altérées chez les nouveau-nés prématurés, exposés à des stimulations sensorielles tactiles dont les propriétés varient et qui peuvent affecter le développement structurel et fonctionnel du cerveau (Dumont et al., 2018b). Les interventions

précoces basées sur le toucher, comme les méthodes de contact en peau à peau, favorisent la régulation des réponses biologiques au stress, et sont facteurs de protection pour un attachement sécure et associées à un meilleur contrôle cognitif à l'âge scolaire (Feldman et al., 2014). Favoriser des expériences sensorielles structurées et adaptées semble être un des leviers pour permettre une efficacité de l'attention exécutive dès le plus jeune âge chez tous les enfants.

Nous envisageons de poursuivre les inclusions et de continuer à évaluer les précurseurs du développement de l'attention exécutive dans une perspective neuroconstructiviste auprès d'enfants au développement typique et atypique. Ce travail de thèse s'inscrit dans un plus vaste programme de recherche²⁶ visant à mieux caractériser le développement des comportements en lien avec le dépistage des troubles neurodéveloppementaux. Au sein de ce programme, nous étudions comment les compétences sensorielles des bébés et des jeunes enfants sont liées au développement de leurs compétences cognitives. L'objectif à long terme de ce programme est de proposer de nouvelles pistes de dépistage, de prévention et de remédiation chez les enfants à risque de trajectoire développementale atypique.

²⁶ <https://decode.unicaen.fr/>

Conclusion

L'objectif de cette thèse était d'explorer les liens entre attention exécutive et traitement sensoriel tactile chez des enfants d'âge préscolaire. Comme nous avons pu l'aborder dans les chapitres théoriques de ce manuscrit, l'attention exécutive est une notion complexe, et contribue à un contrôle cognitif efficient. Elle se développe considérablement au cours de la période préscolaire et ses altérations peuvent prédire dès le plus jeune âge des trajectoires développementales atypiques. Les expériences sensorielles précoces, en particulier tactiles, sont aux fondements des premiers apprentissages cognitifs et constituent un socle fondamental pour le neurodéveloppement ultérieur. Les résultats de nos deux études montrent des liens en situation de vie quotidienne et des liens avec les corrélats neurophysiologiques de l'attention exécutive et du traitement sensoriel tactile.

Ce travail de thèse exploratoire ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des précurseurs sensoriels de l'attention exécutive, et souligne la pertinence d'étudier dès le plus jeune âge la qualité du traitement sensoriel tactile pour comprendre l'évolution vers des trajectoires développementales atypiques. Caractériser davantage de telles relations permettrait aux professionnels dans le champ de la santé et de l'éducation de considérer de nouveaux outils d'évaluation et promouvrait des interventions précoces ciblées sur la sensorialité pour prévenir les troubles attentionnels et réduire leur impact sur le développement cognitif et social des enfants.

Références bibliographiques

- Aarnoudse-Moens, C. S. H., Duivenvoorden, H. J., Weisglas-Kuperus, N., Van Goudoever, J. B. et Oosterlaan, J. (2012). The profile of executive function in very preterm children at 4 to 12 years. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 54(3), 247-253. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2011.04150.x>
- Abraira, V. E. et Ginty, D. D. (2013). The sensory neurons of touch. *Neuron*, 79(4), 618-639. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.051>
- Abundis-Gutiérrez, A., Checa, P., Castellanos, C. et Rosario Rueda, M. (2014). Electrophysiological correlates of attention networks in childhood and early adulthood. *Neuropsychologia*, 57, 78-92. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.02.013>
- Achenbach, T., Dumenci, L. et Rescorla, L. (2001). Ratings of relations between DSM-IV diagnostic categories and items of the CBCL/6-18, TRF, and YSR. *University of Vermont Research Center for Children, Youth, & Families*.
- Adam, N., Blaye, A., Gulbinaite, R., Chabé-Ferret, S. et Farrer, C. (2022). A multidimensional evaluation of the benefits of an ecologically realistic training based on pretend play for preschoolers' cognitive control and self-regulation: From behavior to the underlying theta neuro-oscillatory activity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 216, 105348. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2021.105348>
- Adams, J. N., Feldman, H. M., Huffman, L. C. et Loe, I. M. (2015). Sensory processing in preterm preschoolers and its association with executive function. *Early Human Development*, 91(3), 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2015.01.013>
- Adrien, J.-L. et Gattegno, M. P. (2004). Dépistage précoce de l'autisme à l'aide de films familiaux. Apport de la recherche et d'une démarche rétrospective dans la dynamique de soins. Dans *Santé mentale du jeune enfant : prévenir et intervenir* (p. 85-93). Éres. <https://doi.org/10.3917/eres.hadda.2004.01.0085>
- Al Dahhan, N. Z., Halverson, K., Peek, C. P., Wilmot, D., D'Mello, A., Romeo, R. R., Meegoda, O., Imhof, A., Wade, K., Sridhar, A., Falke, E., Centanni, T. M., Gabrieli, J. D. E. et Christodoulou, J. A. (2022). Dissociating executive function and ADHD influences on reading ability in children with dyslexia. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 153, 126-142. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.03.025>
- Alilović, J., Timmermans, B., Reteig, L. C., van Gaal, S. et Slagter, H. A. (2019). No Evidence that Predictions and Attention Modulate the First Feedforward Sweep of Cortical Information Processing. *Cerebral Cortex*, 29(5), 2261-2278. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz038>

- Allen, S. et Casey, J. (2017). Developmental coordination disorders and sensory processing and integration: Incidence, associations and co-morbidities. *British Journal of Occupational Therapy*, 80(9), 549-557. <https://doi.org/10.1177/0308022617709183>
- Alshaban, F., Aldosari, M., Al-Shammari, H., El-Hag, S., Ghazal, I., Tolefat, M., Ali, M., Kamal, M., Abdel Aati, N., Abeidah, M., Saad, A. H., Dekair, L., Al Khasawneh, M., Ramsay, K. et Fombonne, E. (2019). Prevalence and correlates of autism spectrum disorder in Qatar: a national study. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(12), 1254-1268. <https://doi.org/10.1111/jcpp.13066>
- Annaz, D., Karmiloff-Smith, A. et Thomas, M. S. C. (2008). The importance of tracing developmental trajectories for clinical child neuropsychology. Dans J. Reed et J. Warner-Rogers (dir.), (p. 7-18). Wiley Blackwell. <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1405152664.html>
- Anquetil, M., Roche-Labarbe, N. et Rossi, S. (2023). Tactile sensory processing as a precursor of executive attention: Toward early detection of attention impairments and neurodevelopmental disorders. *WIREs Cognitive Science*, 14(4), e1640. <https://doi.org/10.1002/wcs.1640>
- Apšvalka, D., Ferreira, C. S., Schmitz, T. W., Rowe, J. B. et Anderson, M. C. (2022). Dynamic targeting enables domain-general inhibitory control over action and thought by the prefrontal cortex. *Nature Communications*, 13(1), 274. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27926-w>
- Arpino, C., Compagnone, E., Montanaro, M. L., Cacciatore, D., De Luca, A., Cerulli, A., Di Girolamo, S. et Curatolo, P. (2010). Preterm birth and neurodevelopmental outcome: a review. *Child's Nervous System*, 26(9), 1139-1149. <https://doi.org/10.1007/s00381-010-1125-y>
- Askenazi, S. et Henik, A. (2010). Attentional networks in developmental dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, 6(1), 2. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-6-2>
- Ayres, A. J. (1972). Improving Academic Scoresthrough Sensory Integration. *Journal of Learning Disabilities*, 5(6), 338-343. <https://doi.org/10.1177/002221947200500605>
- Ayres, A. J. et Mailloux, Z. (1981). Influence of Sensory Integration Procedures on Language Development. *The American Journal of Occupational Therapy*, 35(6), 383-390. <https://doi.org/10.5014/ajot.35.6.383>
- Ayres, A. J. et Robbins, J. (2005). *Sensory Integration and the Child: Understanding Hidden Sensory Challenges*. Western Psychological Services.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory* (p. xi, 289). Clarendon Press/Oxford University Press.
- Baek, S., Jaffe-Dax, S. et Emberson, L. L. (2020). How an infant's active response to structured experience supports perceptual-cognitive development. *Progress in Brain Research*, 254, 167-186. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2020.05.015>
- Baghdadli, A., Loubersac, J., Soussana, M., Rattaz, C. et Michelon, C. (2014). Mise en place d'une cohorte française d'enfants et adolescents présentant des troubles du spectre autistique : cohorte

- ELENA. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, 62(5), 297-303.
<https://doi.org/10.1016/j.respe.2014.07.002>
- Baghdadli, A., Miot, S., Rattaz, C., Akbaraly, T., Geoffray, M.-M., Michelon, C., Loubersac, J., Traver, S., Mortamais, M., Sonié, S., Pottelette, J., Robel, L., Speranza, M., Vesperini, S., Maffre, T., Falissard, B., Picot, M.-C., et ELENA Study Group. (2019). Investigating the natural history and prognostic factors of ASD in children: the multicentric Longitudinal study of children with ASD - the ELENA study protocol. *BMJ Open*, 9(6), e026286. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-026286>
- Bahrnick, L. E., Lickliter, R. et Flom, R. (2004). Intersensory redundancy guides the development of selective attention, perception, and cognition. *Current Directions in Psychological Science*, 13(3), 99-102.
- Bailey, R. et Jones, S. M. (2019). An Integrated Model of Regulation for Applied Settings. *Clinical Child and Family Psychology Review*, 22(1), 2-23. <https://doi.org/10.1007/s10567-019-00288-y>
- Baillargeon, R. et Graber, M. (1987). Where's the rabbit? 5.5-month-old infants' representation of the height of a hidden object. *Cognitive Development*, 2(4), 375-392.
[https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(87\)80014-X](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(87)80014-X)
- Baranek, G. T. (1999). Autism During Infancy: A Retrospective Video Analysis of Sensory-Motor and Social Behaviors at 9–12 Months of Age. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 29(3), 213-224. <https://doi.org/10.1023/A:1023080005650>
- 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>
- Barkley, R. A. (2004). Adolescents with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: An Overview of Empirically Based Treatments. *Journal of Psychiatric Practice*®, 10(1), 39-56.
- Barkley, R. A., DuPaul, G. J. et McMurray, M. B. (1990). Comprehensive evaluation of attention deficit disorder with and without hyperactivity as defined by research criteria. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 58(6), 775-789. <https://doi.org/10.1037//0022-006x.58.6.775>
- Baron, I. S., Erickson, K., Ahronovich, M. D., Baker, R. et Litman, F. R. (2011). Cognitive deficit in preschoolers born late-preterm. *Early Human Development*, 87(2), 115-119.
<https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2010.11.010>
- Baron-Cohen, S. (1989). The autistic child's theory of mind: a case of specific developmental delay. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 30(2), 285-297.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1989.tb00241.x>
- Baron-Cohen, S., O'Riordan, M., Stone, V., Jones, R. et Plaisted, K. (1999). Recognition of faux pas by normally developing children and children with Asperger syndrome or high-functioning autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 29(5), 407-418.

- Baron-Cohen, S. (1991). Do People with Autism Understand What Causes Emotion? *Child Development*, 62(2), 385-395. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1991.tb01539.x>
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M. et Frith, U. (1985). Does the autistic child have a “theory of mind”? *Cognition*, 21(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90022-8)
- Barrouillet, P. et Camos, V. (2022). Chapitre 1. L’émergence du concept de mémoire de travail : une approche historique. Dans *La mémoire de travail* (p. 15-40). Mardaga. <https://www.cairn.info/la-memoire-de-travail--9782804720919-p-15.htm>
- Barry, R. J. (2009). Habituation of the orienting reflex and the development of Preliminary Process Theory. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92(2), 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2008.07.007>
- Bátiz, L. F., Illanes, S. E., Romero, R., Barrera, M. del V., Mattar, C. N. Z., Choolani, M. A. et Kemp, M. W. (2022). Climate change and preterm birth: A narrative review. *Environmental Advances*, 10, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100316>
- Baumeister, R. F. et Vohs, K. D. (2016). Chapter Two - Strength Model of Self-Regulation as Limited Resource: Assessment, Controversies, Update. Dans J. M. Olson et M. P. Zanna (dir.), *Advances in Experimental Social Psychology* (vol. 54, p. 67-127). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.aesp.2016.04.001>
- Bavelier, D. et Green, C. S. (2019). Enhancing Attentional Control: Lessons from Action Video Games. *Neuron*, 104(1), 147-163. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.09.031>
- Berger, A., Jones, L., Rothbart, M. K. et Posner, M. I. (2000). Computerized games to study the development of attention in childhood. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 32(2), 297-303. <https://doi.org/10.3758/BF03207798>
- Berger, A., Kofman, O., Livneh, U. et Henik, A. (2007). Multidisciplinary perspectives on attention and the development of self-regulation. *Progress in Neurobiology*, 82(5), 256-286. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2007.06.004>
- Berger, E. M., Fehr, E., Hermes, H., Schunk, D. et Winkel, K. (2020). The Impact of Working Memory Training on Children’s Cognitive and Noncognitive Skills. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3622337>
- Best, J. R. et 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>
- Best, J. R., Miller, P. H. et Jones, L. L. (2009). Executive Functions after Age 5: Changes and Correlates. *Developmental Review: DR*, 29(3), 180-200. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2009.05.002>
- Blair, C. (2002). School readiness: Integrating cognition and emotion in a neurobiological conceptualization of children’s functioning at school entry. *American Psychologist*, 57, 111-127. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.57.2.111>

- Blair, C. et Diamond, A. (2008). Biological processes in prevention and intervention: The promotion of self-regulation as a means of preventing school failure. *Development and Psychopathology*, 20(3), 899-911. <https://doi.org/10.1017/S0954579408000436>
- Blair, C. et Ku, S. (2022). A Hierarchical Integrated Model of Self-Regulation. *Frontiers in Psychology*, 13, 725828. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.725828>
- Blair, C. et Razza, R. P. (2007). Relating Effortful Control, Executive Function, and False Belief Understanding to Emerging Math and Literacy Ability in Kindergarten. *Child Development*, 78(2), 647-663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>
- Blankenship, T. L., Slough, M. A., Calkins, S. D., Deater-Deckard, K., Kim-Spoon, J. et Bell, M. A. (2019). Attention and executive functioning in infancy: Links to childhood executive function and reading achievement. *Developmental Science*, 22(6). <https://doi.org/10.1111/desc.12824>
- Böhm, B., Smedler, A.-C. et Forssberg, H. (2004). Impulse control, working memory and other executive functions in preterm children when starting school. *Acta Paediatrica*, 93(10), 1363-1371. <https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.2004.tb02938.x>
- Boldin, A. M., Geiger, R. et Emberson, L. L. (2018). The emergence of top-down, sensory prediction during learning in infancy: A comparison of full-term and preterm infants. *Developmental Psychobiology*, 60(5), 544-556. <https://doi.org/10.1002/dev.21624>
- Bombonato, C., Del Lucchese, B., Ruffini, C., Di Lieto, M. C., Brovedani, P., Sgandurra, G., Cioni, G. et Pecini, C. (2023). Far Transfer Effects of Trainings on Executive Functions in Neurodevelopmental Disorders: A Systematic Review and Metanalysis. *Neuropsychology Review*. <https://doi.org/10.1007/s11065-022-09574-z>
- Booth, J., Carlson, C. et Tucker, D. (2007). Performance on a neurocognitive measure of alerting differentiates ADHD combined and inattentive subtypes: A preliminary report. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 22(4), 423-432. <https://doi.org/10.1016/j.acn.2007.01.017>
- Booth, J. N., Boyle, J. M. E. et Kelly, S. W. (2010). Do tasks make a difference? Accounting for heterogeneity of performance of children with reading difficulties on tasks of executive function: findings from a meta-analysis. *The British Journal of Developmental Psychology*, 28(Pt 1), 133-176. <https://doi.org/10.1348/026151009x485432>
- Borradori Tolsa, C., Barisnikov, K., Lejeune, F. et Hüppi, P. (2014). Développement des fonctions exécutives de l'enfant prématuré. *Archives de Pédiatrie*, 21(9), 1035-1040. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2014.06.011>
- Botvinick, M. et Braver, T. (2015). Motivation and cognitive control: from behavior to neural mechanism. *Annual Review of Psychology*, 66, 83-113. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015044>
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D. et Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: An update. *Trends in Cognitive Sciences*, 539-546.

- Bremner, A. J. et Spence, C. (2017). Chapter Seven - The Development of Tactile Perception. Dans J. B. Benson (dir.), *Advances in Child Development and Behavior* (vol. 52, p. 227-268). JAI. <https://doi.org/10.1016/bs.acdb.2016.12.002>
- Brisson, J., Serres, J., Gattegno, M. P. et Adrien, J.-L. (2011). Etude des troubles précoces du contact social à partir de l'analyse des films familiaux chez des nourrissons de la naissance à 6 mois ultérieurement diagnostiqués autistes, Summary. *Devenir*, 23(1), 87-106.
- Broadbent, D. E. (1957). A mechanical model for human attention and immediate memory. *Psychological Review*, 64, 205-215. <https://doi.org/10.1037/h0047313>
- Brocki, K. C. et Tillman, C. (2014). Mental Set Shifting in Childhood: The Role of Working Memory and Inhibitory Control. *Infant and Child Development*, 23(6), 588-604. <https://doi.org/10.1002/icd.1871>
- Brocki, K., Clerkin, S. M., Guise, K. G., Fan, J. et Fossella, J. A. (2009). Assessing the molecular genetics of the development of executive attention in children: focus on genetic pathways related to the anterior cingulate cortex and dopamine. *Neuroscience*, 164(1), 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.01.029>
- Brown, T., Swain, E. et Pérez Mármol, J. M. (2021). The Relationship between Children's Sensory Processing and Executive Functions: An Exploratory Study. *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention*, 14(3), 307-324. <https://doi.org/10.1080/19411243.2021.1875386>
- Bryce, D., Whitebread, D. et Szűcs, D. (2015). The relationships among executive functions, metacognitive skills and educational achievement in 5 and 7 year-old children. *Metacognition and Learning*, 10(2), 181-198. <https://doi.org/10.1007/s11409-014-9120-4>
- Bubic, A., Von Cramon, D. Y. et Schubotz, R. I. (2010). Prediction, cognition and the brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00025>
- Cai, W., Griffiths, K., Korgaonkar, M. S., Williams, L. M. et Menon, V. (2021). Inhibition-related modulation of salience and frontoparietal networks predicts cognitive control ability and inattention symptoms in children with ADHD. *Molecular Psychiatry*, 26(8), 4016-4025. <https://doi.org/10.1038/s41380-019-0564-4>
- Callejas, A., Lupiáñez, J., Funes, M. J. et Tudela, P. (2005). Modulations among the alerting, orienting and executive control networks. *Experimental Brain Research*, 167(1), 27-37. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2365-z>
- Callejas, A., Lupiáñez, J. et Tudela, P. (2004). The three attentional networks: On their independence and interactions. *Brain and Cognition*, 54(3), 225-227. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.02.012>
- Camos, V. et Barrouillet, P. (2014). Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie Française*, 59(1), 21-39. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2012.12.003>

- Cantwell, D. P. et Baker, L. (1991). Association Between Attention Deficit-Hyperactivity Disorder and Learning Disorders. *Journal of Learning Disabilities*, 24(2), 88-95. <https://doi.org/10.1177/002221949102400205>
- Carlson, C. L. et Mann, M. (2000). Attention-deficit/hyperactivity disorder, predominantly inattentive subtype. *Child and Adolescent Psychiatric Clinics of North America*, 9(3), 499-510, vi.
- Carretti, B., Cornoldi, C., De Beni, R. et Romanò, M. (2005). Updating in working memory: A comparison of good and poor comprehenders. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91(1), 45-66. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.01.005>
- Casagrande, M., Marotta, A., Martella, D., Volpari, E., Agostini, F., Favieri, F., Forte, G., Rea, M., Ferri, R., Giordano, V., Doricchi, F. et Giovannoli, J. (2022). Assessing the three attentional networks in children from three to six years: A child-friendly version of the Attentional Network Test for Interaction. *Behavior Research Methods*, 54(3), 1403-1415. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01668-5>
- Cascio, C. J. (2010). Somatosensory processing in neurodevelopmental disorders. *Journal of neurodevelopmental disorders*, 2(2), 62-69. <https://doi.org/10.1007/s11689-010-9046-3>
- Cascio, C. J., Moore, D. et McGlone, F. (2019). Social touch and human development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 35, 5-11. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.04.009>
- Case-Smith, J., Weaver, L. L. et Fristad, M. A. (2015). A systematic review of sensory processing interventions for children with autism spectrum disorders. *Autism*, 19(2), 133-148. <https://doi.org/10.1177/1362361313517762>
- Castellanos, F. X., Margulies, D. S., Kelly, A. M. C., Uddin, L. Q., Ghaffari, M., Kirsch, A., Shaw, D., Shehzad, Z., Di Martino, A., Biswal, B., Sonuga-Barke, E. J. S., Rotrosen, J., Adler, L. A. et Milham, M. P. (2008). Cingulate - Precuneus Interactions: A New Locus of Dysfunction in Adult Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological psychiatry*, 63(3), 332-337. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2007.06.025>
- Chai, W. J., Abd Hamid, A. I. et Abdullah, J. M. (2018). Working Memory From the Psychological and Neurosciences Perspectives: A Review. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2018.00401>
- Chau, V., Synnes, A., Grunau, R. E., Poskitt, K. J., Brant, R. et Miller, S. P. (2013). Abnormal brain maturation in preterm neonates associated with adverse developmental outcomes. *Neurology*, 81(24), 2082-2089. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000437298.43688.b9>
- Checa, P., Castellanos, M. C., Abundis-Gutiérrez, A. et Rosario Rueda, M. (2014). Development of neural mechanisms of conflict and error processing during childhood: implications for self-regulation. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2014.00326>
- Chennu, S., Noreika, V., Gueorguiev, D., Blenkmann, A., Kochen, S., Ibáñez, A., Owen, A. M. et Bekinschtein, T. A. (2013). Expectation and attention in hierarchical auditory prediction. *The*

- Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 33(27), 11194-11205. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0114-13.2013>
- Cheung, P. P. P. et Siu, A. M. H. (2009). A comparison of patterns of sensory processing in children with and without developmental disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 30(6), 1468-1480. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2009.07.009>
- Chevalier, N. et Blaye, A. (2006). Le développement de la flexibilité cognitive chez l'enfant préscolaire : enjeux théoriques. *L'Année psychologique*, 106(04), 569. <https://doi.org/10.4074/S0003503306004040>
- Chinawa, J. M., Manyike, P. C., Aniwada, E. C., Chinawa, A. T., Obu, H. A., Odetunde, O. I., Nwokocha, A. R. C. et Ibekwe, R. R. (2016). Prevalence and socioeconomic correlates of autism among children attending primary and secondary schools in south east Nigeria. *African Health Sciences*, 16(4), 936-942. <https://doi.org/10.4314/ahs.v16i4.8>
- Clark, C. A. C., Pritchard, V. E. et Woodward, L. J. (2010). Preschool executive functioning abilities predict early mathematics achievement. *Developmental Psychology*, 46, 1176-1191. <https://doi.org/10.1037/a0019672>
- Clément, E. (2021). *La flexibilité cognitive: Pierre angulaire de l'apprentissage*. ISTE Group.
- Conejero, Á., Guerra, S., Abundis-Gutiérrez, A. et Rueda, M. R. (2018). Frontal theta activation associated with error detection in toddlers: influence of familial socioeconomic status. *Developmental Science*, 21(1), e12494. <https://doi.org/10.1111/desc.12494>
- Conejero, Á. et Rueda, M. R. (2017). Early Development of Executive Attention. *Journal of Child and Adolescent Behavior*, 05(02). <https://doi.org/10.4172/2375-4494.1000341>
- Conway, A. et Stifter, C. A. (2012). Longitudinal Antecedents of Executive Function in Preschoolers. *Child Development*, 83(3), 1022-1036. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01756.x>
- Corniani, G., Casal, M. A., Panzeri, S. et Saal, H. P. (2022). Population coding strategies in human tactile afferents. *PLoS Computational Biology*, 18(12), e1010763. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1010763>
- Cornish, K., Steele, A., Monteiro, C. R. C., Karmiloff-Smith, A. et Scerif, G. (2012). Attention Deficits Predict Phenotypic Outcomes in Syndrome-Specific and Domain-Specific Ways. *Frontiers in Psychology*, 3, 227. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00227>
- Costeloe, K., Hennessy, E., Gibson, A. T., Marlow, N., Wilkinson, A. R., et for the EPICure Study Group. (2000). The EPICure Study: Outcomes to Discharge From Hospital for Infants Born at the Threshold of Viability. *Pediatrics*, 106(4), 659-671. <https://doi.org/10.1542/peds.106.4.659>
- Costeloe, K. L., Hennessy, E. M., Haider, S., Stacey, F., Marlow, N. et Draper, E. S. (2012). Short term outcomes after extreme preterm birth in England: comparison of two birth cohorts in 1995 and 2006 (the EPICure studies). *BMJ*, 345, e7976. <https://doi.org/10.1136/bmj.e7976>
- Courchesne, E. et Allen, G. (1997). Prediction and preparation, fundamental functions of the cerebellum. *Learning & Memory*, 4(1), 1-35. <https://doi.org/10.1101/lm.4.1.1>

- Courchesne, E., Townsend, J., Akshoomoff, N. A., Saitoh, O., Yeung-Courchesne, R., Lincoln, A. J., James, H. E., Haas, R. H., Schreibman, L. et Lau, L. (1994). Impairment in shifting attention in autistic and cerebellar patients. *Behavioral Neuroscience*, *108*(5), 848-865. <https://doi.org/10.1037//0735-7044.108.5.848>
- Cowan, N. (2017). The many faces of working memory and short-term storage. *Psychonomic Bulletin & Review*, *24*(4), 1158-1170. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1191-6>
- Cragg, L. et Gilmore, C. (2014). Skills underlying mathematics: The role of executive function in the development of mathematics proficiency. *Trends in Neuroscience and Education*, *3*(2), 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.12.001>
- Crisci, G., Caviola, S., Cardillo, R. et Mammarella, I. C. (2021). Executive Functions in Neurodevelopmental Disorders: Comorbidity Overlaps Between Attention Deficit and Hyperactivity Disorder and Specific Learning Disorders. *Frontiers in Human Neuroscience*, *15*, 594234. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.594234>
- Cueli, M., Areces, D., García, T., Alves, R. A. et González-Castro, P. (2020). Attention, inhibitory control and early mathematical skills in preschool students. *Psicothema*, *32*, 237-244.
- Cuevas, K. et Bell, M. A. (2010). Developmental progression of looking and reaching performance on the A-not-B task. *Developmental Psychology*, *46*, 1363-1371. <https://doi.org/10.1037/a0020185>
- Cuevas, K. et Bell, M. A. (2014). Infant Attention and Early Childhood Executive Function. *Child Development*, *85*(2), 397-404. <https://doi.org/10.1111/cdev.12126>
- Cuevas, K., Bell, M. A., Marcovitch, S. et Calkins, S. D. (2012). Electroencephalogram and heart rate measures of working memory at 5 and 10 months of age. *Developmental Psychology*, *48*, 907-917. <https://doi.org/10.1037/a0026448>
- Dajani, D. R., Llabre, M. M., Nebel, M. B., Mostofsky, S. H. et Uddin, L. Q. (2016). Heterogeneity of executive functions among comorbid neurodevelopmental disorders. *Scientific Reports*, *6*(1). <https://doi.org/10.1038/srep36566>
- Dawson, M., Soulières, I., Ann Gernsbacher, M. et Mottron, L. (2007). The Level and Nature of Autistic Intelligence. *Psychological science*, *18*(8), 657-662. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01954.x>
- de Courson-Fournerie, F., Layouni, I., Palis, G., Larnaudie, P. et Dugravier, R. (2021). Prise en charge précoce pédiatrique et pédopsychiatrique des enfants présentant ou à risque de présenter des troubles du neurodéveloppement : l’histoire de l’Institut Paris Brune, exemple de collaboration des services médicosocial et sanitaire : le Centre d’Action MédicoSociale Précoce (CAMSP) Paris Brune et le Centre de Psychopathologie périnatale du Boulevard Brune CPBB (CMP Petite Enfance 0-3 ans). *Perfectionnement en Pédiatrie*, *4*(1), 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.perped.2021.01.007>
- Dehaene, S. (2018). The Error-Related Negativity, Self-Monitoring, and Consciousness. *Perspectives on Psychological Science*, *13*(2), 161-165. <https://doi.org/10.1177/1745691618754502>

- Dehaene, S. (2020). *How We Learn: Why Brains Learn Better Than Any Machine . . . for Now*. Penguin.
- Dehaene-Lambertz, G. (1997). Cartographie des potentiels évoqués dans l'exploration des fonctions cognitives des nourrissons. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology*, 2(27), 160-161.
- Dehaene-Lambertz, G. et Spelke, E. S. (2015). The Infancy of the Human Brain. *Neuron*, 88(1), 93-109. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.026>
- Demangeon, A., Claudel-Valentin, S., Aubry, A. et Tazouti, Y. (2023). A meta-analysis of the effects of Montessori education on five fields of development and learning in preschool and school-age children. *Contemporary Educational Psychology*, 73, 102182. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2023.102182>
- Demetriou, A., Kazali, E., Kazi, S. et Spanoudis, G. (2020). Cognition and cognizance in preschool predict school achievement in primary school. *Cognitive Development*, 54, 100872. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2020.100872>
- Dercksen, T. T., Widmann, A., Scharf, F. et Wetzel, N. (2022). Sound omission related brain responses in children. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 53, 101045. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.101045>
- Dercksen, T. T., Widmann, A., Schröger, E. et Wetzel, N. (2020). Omission related brain responses reflect specific and unspecific action-effect couplings. *NeuroImage*, 215, 116840. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116840>
- de Souza Almeida, R., Faria-Jr, A. et Klein, R. M. (2021). On the origins and evolution of the Attention Network Tests. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 126, 560-572. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.028>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. et Lee, K. (2011). Interventions shown to Aid Executive Function Development in Children 4–12 Years Old. *Science (New York, N.Y.)*, 333(6045), 959-964. <https://doi.org/10.1126/science.1204529>
- Diamond, A. et Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Dickstein, S. G., Bannon, K., Xavier Castellanos, F. et Milham, M. P. (2006). The neural correlates of attention deficit hyperactivity disorder: an ALE meta-analysis. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(10), 1051-1062. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01671.x>
- Döhla, D. et Heim, S. (2016). Developmental Dyslexia and Dysgraphia: What can We Learn from the One About the Other? *Frontiers in Psychology*, 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2015.02045>

- Döhla, D., Willmes, K. et Heim, S. (2018). Cognitive Profiles of Developmental Dysgraphia. *Frontiers in Psychology*, 9, 2006. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02006>
- Dosenbach, N. U. F., Fair, D. A., Cohen, A. L., Schlaggar, B. L. et Petersen, S. E. (2008). A dual-networks architecture of top-down control. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(3), 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.01.001>
- Douglas, V. I. (1999). Cognitive Control Processes in Attention Deficit/Hyperactivity Disorder. Dans H. C. Quay et A. E. Hogan (dir.), *Handbook of Disruptive Behavior Disorders* (p. 105-138). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4881-2_5
- Douglas, V. I. (2005). Cognitive Deficits in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder: A Long-Term Follow-Up. *Canadian Psychology / Psychologie canadienne*, 46, 23-31. <https://doi.org/10.1037/h0085821>
- Douglas, V. I. et Peters, K. G. (1979). Toward a Clearer Definition of the Attentional Deficit of Hyperactive Children. Dans G. A. Hale et M. Lewis (dir.), *Attention and Cognitive Development* (p. 173-247). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2985-5_8
- Dubin, M. J., Maia, T. V. et Peterson, B. S. (2010). Cognitive Control in the Service of Self-Regulation. Dans G. F. Koob, M. L. Moal et R. F. Thompson (dir.), *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience* (p. 288-293). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045396-5.00218-9>
- Dumont, V., Bulla, J., Bessot, N., Gonidec, J., Zabalia, M., Guillois, B. et Roche-Labarbe, N. (2017). The manual orienting response habituation to repeated tactile stimuli in preterm neonates: Discrimination of stimulus locations and interstimulus intervals. *Developmental Psychobiology*, 59(5), 590-602. <https://doi.org/10.1002/dev.21526>
- Dumont, V., Delaunay El Allam, M., Guillois, B., Zabalia, M. et Roche-Labarbe, N. (2018a). La perception tactile et ses implications dans la prise en charge néonatale. *Revue de Médecine Périnatale*, 10(4), 184-190. <https://doi.org/10.3166/rmp-2018-0034>
- Dumont, V., Delaunay El Allam, M., Guillois, B., Zabalia, M. et Roche-Labarbe, N. (2018b). La perception tactile et ses implications dans la prise en charge néonatale. *Revue de Médecine Périnatale*, 10(4), 184-190. <https://doi.org/10.3166/rmp-2018-0034>
- Dumont, V., Giovannella, M., Zuba, D., Clouard, R., Durduran, T., Guillois, B. et Roche-Labarbe, N. (2022). Somatosensory prediction in the premature neonate brain. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 57, 101148. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101148>
- Dunn, W. (2001). The sensations of everyday life: empirical, theoretical, and pragmatic considerations. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 55(6), 608-620. <https://doi.org/10.5014/ajot.55.6.608>
- Dunn, W. et Brown, C. (1997). Factor Analysis on the Sensory Profile From a National Sample of Children Without Disabilities. *American Journal of Occupational Therapy*, 51(7), 490-495. <https://doi.org/10.5014/ajot.51.7.490>

- Edalati, M., Mahmoudzadeh, M., Ghostine, G., Kongolo, G., Safaie, J., Wallois, F. et Moghimi, S. (2022). Preterm neonates distinguish rhythm violation through a hierarchy of cortical processing. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 58, 101168. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101168>
- Eeles, A. L., Spittle, A. J., Anderson, P. J., Brown, N., Lee, K. J., Boyd, R. N. et Doyle, L. W. (2013). Assessments of sensory processing in infants: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(4), 314-326. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04434.x>
- Eisenberg, N., Fabes, R. A., Nyman, M., Bernzweig, J. et Pinuelas, A. (1994). The relations of emotionality and regulation to children's anger-related reactions. *Child Development*, 65(1), 109-128. <https://doi.org/10.2307/1131369>
- Elsabbagh, M., Divan, G., Koh, Y.-J., Kim, Y. S., Kauchali, S., Marcín, C., Montiel-Nava, C., Patel, V., Paula, C. S., Wang, C., Yasamy, M. T. et Fombonne, E. (2012). Global Prevalence of Autism and Other Pervasive Developmental Disorders. *Autism Research*, 5(3), 160-179. <https://doi.org/10.1002/aur.239>
- Emberson, L. L., Boldin, A., Riccio, J. E., Guillet, R. et Aslin, R. N. (2017). Deficits in Top-Down Sensory Prediction in Infants At-Risk Due to Premature Birth. *Current biology : CB*, 27(3), 431-436. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.12.028>
- Emberson, L. L., Richards, J. E. et Aslin, R. N. (2015). Top-down modulation in the infant brain: Learning-induced expectations rapidly affect the sensory cortex at 6 months. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(31), 9585-9590. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510343112>
- Espenhahn, S., Godfrey, K. J., Kaur, S., Ross, M., Nath, N., Dmitrieva, O., McMorris, C., Cortese, F., Wright, C., Murias, K., Dewey, D., Protzner, A. B., McCrimmon, A., Bray, S. et Harris, A. D. (2021). Tactile cortical responses and association with tactile reactivity in young children on the autism spectrum. *Molecular Autism*, 12(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s13229-021-00435-9>
- Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A. et Senn, T. E. (2004). The contribution of executive functions to emergent mathematic skills in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 26(1), 465-486. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_6
- Ewen, J. B. et Shapiro, B. K. (2005). Disorders of Attention or Learning in Neurodevelopmental Disorders. *Seminars in Pediatric Neurology*, 12(4), 229-241. <https://doi.org/10.1016/j.spen.2005.12.005>
- Fabio, R. A. et Urso, M. (2014). The analysis of Attention Network in ADHD, attention problems and typically developing subjects. *Life Span and Disability*, 17(2), 199-221.
- Fair, D. A., Posner, J., Nagel, B. J., Bathula, D., Dias, T. G. C., Mills, K. L., Blythe, M. S., Giwa, A., Schmitt, C. F. et Nigg, J. T. (2010). Atypical default network connectivity in youth with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 68(12), 1084-1091. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.07.003>

- Fan, J, Bernardi, S., Van Dam, N. T., Anagnostou, E., Gu, X., Martin, L., Park, Y., Liu, X., Kolevzon, A., Soorya, L., Grodberg, D., Hollander, E. et Hof, P. R. (2012). Functional deficits of the attentional networks in autism. *Brain and Behavior*, 2(5), 647-660. <https://doi.org/10.1002/brb3.90>
- Fan, J, McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A. et Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 340-347. <https://doi.org/10.1162/089892902317361886>
- Fan, J, Mccandliss, B., Fossella, J., Flombaum, J. et Posner, M. (2005). The activation of attentional networks. *NeuroImage*, 26(2), 471-479. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.02.004>
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A. et Posner, M. I. (2002). Testing the Efficiency and Independence of Attentional Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 340-347. <https://doi.org/10.1162/089892902317361886>
- Fan, L., Qing, W., Wang, Y. et Zhan, M. (2022). Family Socioeconomic Status and Attention Deficit/Hyperactivity Disorder in Preschool Children: The Mediating Role of Executive Function. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11608. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811608>
- Farah, R., Glukhovsky, N., Rosch, K. et Horowitz-Kraus, T. (2022). Structural white matter characteristics for working memory and switching/inhibition in children with reading difficulties: The role of the left superior longitudinal fasciculus. *Network Neuroscience (Cambridge, Mass.)*, 6(3), 897-915. https://doi.org/10.1162/netn_a_00257
- Farmer, M., Baille, N., Doublet, C. et Kojayan, R. (2021). 1 000 jours pour changer l’avenir : ces signes précoces de troubles du neurodéveloppement permettant une prise en charge précoce. *Périnatalité*, 13(2), 68-76. <https://doi.org/10.3166/rmp-2021-0117>
- Farran, E. K. et Karmiloff-Smith, A. (2011). *Neurodevelopmental Disorders Across the Lifespan: A neuroconstructivist approach*. OUP Oxford.
- Farrant, K. et Uddin, L. Q. (2016). Atypical developmental of dorsal and ventral attention networks in autism. *Developmental Science*, 19(4), 550-563. <https://doi.org/10.1111/desc.12359>
- Feito, J., García-Suárez, O., García-Piqueras, J., García-Mesa, Y., Pérez-Sánchez, A., Suazo, I., Cabo, R., Suárez-Quintanilla, J., Cobo, J. et Vega, J. A. (2018). The development of human digital Meissner’s and Pacinian corpuscles. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 219, 8-24. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2018.05.001>
- Feldman, H. et Friston, K. (2010). Attention, Uncertainty, and Free-Energy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2010.00215>
- Feldman, R., Rosenthal, Z. et Eidelman, A. I. (2014). Maternal-Preterm Skin-to-Skin Contact Enhances Child Physiologic Organization and Cognitive Control Across the First 10 Years of Life. *Biological Psychiatry*, 75(1), 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2013.08.012>

- Fiske, A., de Klerk, C., Lui, K. Y. K., Collins-Jones, L., Hendry, A., Greenhalgh, I., Hall, A., Scerif, G., Dvergsdal, H. et Holmboe, K. (2022). The neural correlates of inhibitory control in 10-month-old infants: A functional near-infrared spectroscopy study. *NeuroImage*, 257, 119241. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119241>
- Fiske, A. et Holmboe, K. (2019). Neural substrates of early executive function development. *Developmental Review*, 52, 42-62. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2019.100866>
- Fluss, J., Ziegler, J., Ecalle, J., Magnost, A., Warszawski, J., Ducot, B., Richard, G. et Billard, C. (2008). Prévalence des troubles d'apprentissages du langage écrit en début de scolarité : l'impact du milieu socioéconomique dans 3 zones d'éducatons distinctes. *Archives de Pédiatrie*, 15(6), 1049-1057. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2008.02.012>
- Fodor, J. (1983). *Modularity of Mind*. Mit Press.
- Francés, L., Quintero, J., Fernández, A., Ruiz, A., Caules, J., Fillon, G., Hervás, A. et Soler, C. V. (2022). Current state of knowledge on the prevalence of neurodevelopmental disorders in childhood according to the DSM-5: a systematic review in accordance with the PRISMA criteria. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, 16(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s13034-022-00462-1>
- Freedman, L., Zivan, M., Farah, R. et Horowitz-Kraus, T. (2020). Greater functional connectivity within the cingulo-opercular and ventral attention networks is related to better fluent reading: A resting-state functional connectivity study. *NeuroImage. Clinical*, 26, 102214. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102214>
- Friedman, N. P. et Miyake, A. (2004). The Relations Among Inhibition and Interference Control Functions: A Latent-Variable Analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 101-135. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.1.101>
- Friedman, N. P. et Robbins, T. W. (2022). The role of prefrontal cortex in cognitive control and executive function. *Neuropsychopharmacology*, 47(1), 72-89. <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01132-0>
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815-836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>
- Frith, U. et Happé, F. (1994). Autism: beyond « theory of mind ». *Cognition*, 50(1-3), 115-132.
- Frye, D., Zelazo, P. D. et Palfai, T. (1995). Theory of mind and rule-based reasoning. *Cognitive Development*, 10, 483-527. [https://doi.org/10.1016/0885-2014\(95\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0885-2014(95)90024-1)
- Garon, N., Bryson, S. E. et Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: a review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31-60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Garon, N. M., Piccinin, C. et Smith, I. M. (2016). Does the BRIEF-P Predict Specific Executive Function Components in Preschoolers? *Applied Neuropsychology: Child*, 5(2), 110-118. <https://doi.org/10.1080/21622965.2014.1002923>

- Garry, C., Martel, K., Sorin, A.-L., Rovira, K. et Brisson, J. (2015). Etude longitudinale des interactions prosodiques précoces entre parent et enfant ultérieurement diagnostiqué autiste. *Devenir*, 27(4), 217-229. <https://doi.org/10.3917/dev.154.0217>
- Geary, D. C. (2011). Cognitive Predictors of Achievement Growth in Mathematics: A Five Year Longitudinal Study. *Developmental psychology*, 47(6), 1539-1552. <https://doi.org/10.1037/a0025510>
- Genet, J. J. et Siemer, M. (2011). Flexible control in processing affective and non-affective material predicts individual differences in trait resilience. *Cognition and Emotion*, 25(2), 380-388. <https://doi.org/10.1080/02699931.2010.491647>
- Gentaz, E. et Richard, S. (2022). The Behavioral Effects of Montessori Pedagogy on Children's Psychological Development and School Learning. *Children*, 9(2), 133. <https://doi.org/10.3390/children9020133>
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J. et Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: performance of children 3 1/2-7 years old on a Stroop-like day-night test. *Cognition*, 53(2), 129-153. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90068-x](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90068-x)
- Ghanizadeh, A. (2008). Tactile Sensory Dysfunction in Children with ADHD. *Behavioural Neurology*, 20(3-4), 107-112. <https://doi.org/10.1155/2008/786905>
- Ghirardi, L., Brikell, I., Kuja-Halkola, R., Freitag, C. M., Franke, B., Asherson, P., Lichtenstein, P. et Larsson, H. (2018). The familial co-aggregation of ASD and ADHD: a register-based cohort study. *Molecular Psychiatry*, 23(2), 257-262. <https://doi.org/10.1038/mp.2017.17>
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C. et 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>
- Gioia, G. A., Espy, K. A. et Isquith, P. K. (2003). *BRIEF-P: Behavior Rating Inventory of Executive Function--preschool Version : Professional Manual*. Psychological Assessment Resources.
- Gire, C., Beltran Anzola, A., Kaminski, M., Baumstarck, K., Ancel, P.-Y., Berbis, J., Zahed, M., Garcia, P., Desiles, T., Zahed, L., Pache, M., Menard, G., Bednarek Weirauch, N., Voirin, K., Verriere, V., Cambonie, G., Lerat, C., Poujol, M., Claris, O., ... for EPIREMED-Study Group. (2021). A randomized EPIREMED protocol study on the long-term visuo spatial effects of very preterm children with a working memory deficit. *BMC Pediatrics*, 21(1), 402. <https://doi.org/10.1186/s12887-021-02867-x>
- Gire, C., Garbi, A., Zahed, M., Beltran Anzola, A., Tosello, B. et Datin-Dorrière, V. (2022). Neurobehavioral Phenotype and Dysexecutive Syndrome of Preterm Children: Comorbidity or Trigger? An Update. *Children*, 9(2), 239. <https://doi.org/10.3390/children9020239>
- Gkeka, E. G., Gougoudi, Î., Mertsioti, L. et Drigas, A. S. (2018). Intervention for ADHD Child using the Montessori Method and ICTs. *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)*, 6(2), 4-13. <https://doi.org/10.3991/ijes.v6i2.8729>

- Gliga, T., Jones, E. J. H., Bedford, R., Charman, T. et Johnson, M. H. (2014). From early markers to neuro-developmental mechanisms of autism. *Developmental Review*, 34(3), 189-207. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2014.05.003>
- Goldenberg, R. L., Culhane, J. F., Iams, J. D. et Romero, R. (2008). Epidemiology and causes of preterm birth. *The Lancet*, 371(9606), 75-84. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)60074-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)60074-4)
- Gonzalez-Gadea, M. L., Chennu, S., Bekinschtein, T. A., Rattazzi, A., Beraudi, A., Tripicchio, P., Moyano, B., Soffita, Y., Steinberg, L., Adolphi, F., Sigman, M., Marino, J., Manes, F. et Ibanez, A. (2015). Predictive coding in autism spectrum disorder and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Neurophysiology*, 114(5), 2625-2636. <https://doi.org/10.1152/jn.00543.2015>
- Gottlieb, G. (2007). Probabilistic epigenesis. *Developmental Science*, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00556.x>
- Granier-Deferre, C. et Schaal, B. (2005). Aux sources fœtales des réponses sensorielles et émotionnelles du nouveau-né. *Spirale*, no 33(1), 21-40.
- Gratton, G., Cooper, P., Fabiani, M., Carter, C. S. et Karayanidis, F. (2018). Dynamics of cognitive control: Theoretical bases, paradigms, and a view for the future. *Psychophysiology*, 55(3). <https://doi.org/10.1111/psyp.13016>
- Green, S. A., Hernandez, L., Bookheimer, S. Y. et Dapretto, M. (2016). Salience Network Connectivity in Autism Is Related to Brain and Behavioral Markers of Sensory Overresponsivity. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 55(7), 618-626.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2016.04.013>
- Guillot, M., Chau, V. et Lemyre, B. (2020). L'imagerie cérébrale systématique du nouveau-né prématuré. *Paediatrics & Child Health*, 25(4), 256-262. <https://doi.org/10.1093/pch/pxaa030>
- Hackman, D. A. et Farah, M. J. (2009). Socioeconomic status and the developing brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.003>
- Háden, G. P., Honing, H., Török, M. et Winkler, I. (2015). Detecting the temporal structure of sound sequences in newborn infants. *International Journal of Psychophysiology*, 96(1), 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.02.024>
- Ham, T., Leff, A., de Boissezon, X., Joffe, A. et Sharp, D. J. (2013). Cognitive Control and the Salience Network: An Investigation of Error Processing and Effective Connectivity. *Journal of Neuroscience*, 33(16), 7091-7098. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4692-12.2013>
- Hanly, C., Shah, H., Au, P. Y. B. et Murias, K. (2021). Description of neurodevelopmental phenotypes associated with 10 genetic neurodevelopmental disorders: A scoping review. *Clinical Genetics*, 99(3), 335-346. <https://doi.org/10.1111/cge.13882>
- Happé, F. (1995). The role of age and verbal ability in the theory of mind task performance of subjects with autism. *Child Development*, 66, 843-855. <https://doi.org/10.2307/1131954>

- Happé, F. (1999). Autism: cognitive deficit or cognitive style? *Trends in Cognitive Sciences*, 3(6), 216-222. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01318-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01318-2)
- Heeren, T., Joseph, R. M., Allred, E. N., O'Shea, T. M., Leviton, A. et Kuban, K. C. K. (2017). Cognitive functioning at the age of 10 years among children born extremely preterm: a latent profile approach. *Pediatric Research*, 82(4), 614-619. <https://doi.org/10.1038/pr.2017.82>
- Hendry, A., Jones, E. J. H. et Charman, T. (2016). Executive function in the first three years of life: Precursors, predictors and patterns. *Developmental Review*, 42, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2016.06.005>
- Holmboe, K., Larkman, C., Klerk, C. de, Simpson, A., Bell, M. A., Patton, L., Christodoulou, C. et Dvergsdal, H. (2021). The early childhood inhibitory touchscreen task: A new measure of response inhibition in toddlerhood and across the lifespan. *PLOS ONE*, 16(12), e0260695. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260695>
- Holmboe, K., Pasco Fearon, R. M., Csibra, G., Tucker, L. A. et Johnson, M. H. (2008). Freeze-Frame: A new infant inhibition task and its relation to frontal cortex tasks during infancy and early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 100(2), 89-114. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.09.004>
- Hooker, D. (1938). The origin of the grasping movement in man. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 79, 597-606.
- Hubert, B. (2015). *Etude des relations entre capacités d'autorégulation, compétences sociales et acquisitions scolaires dans la transition école maternelle/école élémentaire* [thesis, Nantes]. <http://www.theses.fr/2015NANT3026>
- Hubert, B., Guimard, P., Florin, A. et Tracy, A. (2015). Indirect and Direct Relationships Between Self-Regulation and Academic Achievement During the Nursery/Elementary School Transition of French Students. *Early Education and Development*, 26(5-6), 685-707. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.1037624>
- Inguaggiato, E., Sgandurra, G. et Cioni, G. (2017). Brain plasticity and early development: Implications for early intervention in neurodevelopmental disorders. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 65(5), 299-306. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2017.03.009>
- Jeste, S. S. (2015). Neurodevelopmental Behavioral and Cognitive Disorders: *CONTINUUM: Lifelong Learning in Neurology*, 21, 690-714. <https://doi.org/10.1212/01.CON.0000466661.89908.3c>
- Jiang, J., Summerfield, C. et Egner, T. (2013). Attention Sharpens the Distinction between Expected and Unexpected Percepts in the Visual Brain. *Journal of Neuroscience*, 33(47), 18438-18447. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3308-13.2013>
- Johann, V., Könen, T. et Karbach, J. (2020). The unique contribution of working memory, inhibition, cognitive flexibility, and intelligence to reading comprehension and reading speed. *Child Neuropsychology*, 26(3), 324-344. <https://doi.org/10.1080/09297049.2019.1649381>

- Johnson, A., Nelson, J. M., Tomaso, C. C., James, T., Espy, K. A. et Nelson, T. D. (2020). Preschool executive control predicts social information processing in early elementary school. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *71*, 101195. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2020.101195>
- Johnson, M. H. (2000). Functional brain development in infants: elements of an interactive specialization framework. *Child Development*, *71*(1), 75-81. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00120>
- Johnson, M. H., Charman, T., Pickles, A. et Jones, E. J. H. (2021). Annual Research Review: Anterior Modifiers in the Emergence of Neurodevelopmental Disorders (AMEND)—a systems neuroscience approach to common developmental disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *62*(5), 610-630. <https://doi.org/10.1111/jcpp.13372>
- Johnson, M. H., Gliga, T., Jones, E. et Charman, T. (2015). Annual Research Review: Infant development, autism, and ADHD – early pathways to emerging disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *56*(3), 228-247. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12328>
- Johnson, M. H., Posner, M. I. et 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, S. et Marlow, N. (2011). Preterm Birth and Childhood Psychiatric Disorders: *Pediatric Research*, *69*(5 Part 2), 11R-18R. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e318212faa0>
- Jones, E. J. H., Gliga, T., Bedford, R., Charman, T. et Johnson, M. H. (2014). Developmental pathways to autism: A review of prospective studies of infants at risk. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *39*(Supplement C), 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.12.001>
- Jouen, F. et Molina, M. (2005). Exploration of the newborn's manual activity: A window onto early cognitive processes. *Infant Behavior and Development*, *28*(3), 227-239. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2005.05.001>
- Just, M. A., Cherkassky, V. L., Keller, T. A., Kana, R. K. et Minshew, N. J. (2007). Functional and Anatomical Cortical Underconnectivity in Autism: Evidence from an fMRI Study of an Executive Function Task and Corpus Callosum Morphometry. *Cerebral Cortex*, *17*(4), 951-961. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl006>
- Just, M. A., Cherkassky, V. L., Keller, T. A. et Minshew, N. J. (2004). Cortical activation and synchronization during sentence comprehension in high-functioning autism: evidence of underconnectivity. *Brain*, *127*(8), 1811-1821. <https://doi.org/10.1093/brain/awh199>
- Just, M. A., Keller, T. A., Malave, V. L., Kana, R. K. et Varma, S. (2012). Autism as a neural systems disorder: A theory of frontal-posterior underconnectivity. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *36*(4), 1292-1313. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.02.007>
- Kagan, J. et Baird, A. (2004). Brain and behavioral development during childhood. Dans *The cognitive neurosciences*, 3rd ed (p. 93-103). MIT Press.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice Hall.

- Kane, M. J. et Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 637-671. <https://doi.org/10.3758/BF03196323>
- Kane, M. J., Meier, M. E., Smeekens, B. A., Gross, G. M., Chun, C. A., Silvia, P. J. et Kwapil, T. R. (2016). Individual differences in the executive control of attention, memory, and thought, and their associations with schizotypy. *Journal of Experimental Psychology. General*, 145(8), 1017-1048. <https://doi.org/10.1037/xge0000184>
- Karmiloff-Smith, A. (1998). Development itself is the key to understanding developmental disorders. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(10), 389-398.
- Karmiloff-Smith, A. (2006). The tortuous route from genes to behavior: A neuroconstructivist approach. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 6(1), 9-17. <https://doi.org/10.3758/CABN.6.1.9>
- Karmiloff-Smith, A. (2009). Preaching to the Converted? From Constructivism to Neuroconstructivism. *Child Development Perspectives*, 3(2), 99-102. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2009.00086.x>
- Karmiloff-Smith, A., D'Souza, D., Dekker, T. M., Van Herwegen, J., Xu, F., Rodic, M. et Ansari, D. (2012). Genetic and environmental vulnerabilities in children with neurodevelopmental disorders. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(supplement_2), 17261-17265. <https://doi.org/10.1073/pnas.1121087109>
- Karmiloff-Smith, A., Thomas, M., Annaz, D., Humphreys, K., Ewing, S., Brace, N., Van Duuren, M., Pike, G., Grice, S. et Campbell, R. (2004). Exploring the Williams syndrome face-processing debate: the importance of building developmental trajectories. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(7), 1258-1274. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00322.x>
- Karr, J. E., Areshenkoff, C. N., Rast, P., Hofer, S. M., Iverson, G. L. et Garcia-Barrera, M. A. (2018). The unity and diversity of executive functions: A systematic review and re-analysis of latent variable studies. *Psychological Bulletin*, 144, 1147-1185. <https://doi.org/10.1037/bul0000160>
- Kaufman, A. S. et Kaufman, N. L. (2014). Kaufman Brief Intelligence Test, Second Edition. Dans *Encyclopedia of Special Education*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118660584.ese1325>
- Keehn, B., Lincoln, A. J., Müller, R.-A. et Townsend, J. (2010). Attentional networks in children and adolescents with autism spectrum disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 51(11), 1251-1259. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02257.x>
- Kenworthy, L., Anthony, L. G., Naiman, D. Q., Cannon, L., Wills, M. C., Luong-Tran, C., Werner, M. A., Alexander, K. C., Strang, J., Bal, E., Sokoloff, J. L. et Wallace, G. L. (2014). Randomized Controlled Effectiveness Trial of Executive Function Invention for Children on the Autism Spectrum. *Journal of child psychology and psychiatry, and allied disciplines*, 55(4), 374-383. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12161>

- Kerr-German, A., Namuth, A., Santosa, H., Buss, A. T. et White, S. (2022). To snack or not to snack: Using fNIRS to link inhibitory control to functional connectivity in the toddler brain. *Developmental Science*, 25(4), e13229. <https://doi.org/10.1111/desc.13229>
- Kessler, Y. et Oberauer, K. (2014). Working memory updating latency reflects the cost of switching between maintenance and updating modes of operation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40, 738-754. <https://doi.org/10.1037/a0035545>
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Gillberg, C. G., Forssberg, H. et Westerberg, H. (2005). Computerized training of working memory in children with ADHD--a randomized, controlled trial. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177-186. <https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010>
- Kodituwakku, P. W. (2009). Neurocognitive profile in children with fetal alcohol spectrum disorders. *Developmental Disabilities Research Reviews*, 15(3), 218-224. <https://doi.org/10.1002/ddrr.73>
- Koenig-Zores, C. et Kuhn, P. (2016). Les unités de néonatalogie, un environnement inhospitalier? Perceptions et attentes sensorielles du nouveau-né prématuré hospitalisé. *Revue de médecine périnatale*, 8(3), 141-148. <https://doi.org/10.1007/s12611-016-0374-8>
- Kok, P., Rahnev, D., Jehee, J. F. M., Lau, H. C. et de Lange, F. P. (2012). Attention reverses the effect of prediction in silencing sensory signals. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 22(9), 2197-2206. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr310>
- Konrad, K., Neufang, S., Hanisch, C., Fink, G. R. et Herpertz-Dahlmann, B. (2006). Dysfunctional Attentional Networks in Children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder: Evidence from an Event-Related Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *Biological Psychiatry*, 59(7), 643-651. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.08.013>
- Kopp, B., Rist, F. et Mattler, U. (1996). N200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control. *Psychophysiology*, 33(3), 282-294. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1996.tb00425.x>
- Korkman, M., Kirk, U. et Kemp, S. (2012). *NEPSY-II: Manuel d'administration*. ECPA.
- Kostović Srzentić, M., Raguž, M. et Ozretić, D. (2020). Specific cognitive deficits in preschool age correlated with qualitative and quantitative MRI parameters in prematurely born children. *Pediatrics & Neonatology*, 61(2), 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.pedneo.2019.09.003>
- Kouider, S., Long, B., Le Stanc, L., Charron, S., Fievet, A.-C., Barbosa, L. S. et Gelskov, S. V. (2015). Neural dynamics of prediction and surprise in infants. *Nature Communications*, 6(1), 8537. <https://doi.org/10.1038/ncomms9537>
- Kouider, S., Stahlhut, C., Gelskov, S. V., Barbosa, L. S., Dutat, M., de Gardelle, V., Christophe, A., Dehaene, S. et Dehaene-Lambertz, G. (2013). A neural marker of perceptual consciousness in infants. *Science*, 340(6130), 376-380.
- Lachaux, J.-P. (2015). *Le Cerveau funambule: Comprendre et apprivoiser son attention grâce aux neurosciences*. Odile Jacob.

- Lambek, R., Tannock, R., Dalsgaard, S., Trillingsgaard, A., Damm, D. et Thomsen, P. H. (2011). Executive Dysfunction in School-Age Children With ADHD. *Journal of Attention Disorders*, *15*(8), 646-655. <https://doi.org/10.1177/1087054710370935>
- Lange, S., Shield, K., Rehm, J., Anagnostou, E. et Popova, S. (2019). Fetal alcohol spectrum disorder: neurodevelopmentally and behaviorally indistinguishable from other neurodevelopmental disorders. *BMC Psychiatry*, *19*(1), 322. <https://doi.org/10.1186/s12888-019-2289-y>
- Larroque, B., Delobel, M., Arnaud, C. et Marchand, L. (2008). Devenir à 5 et 8 ans des enfants grands prématurés dans l'étude Épipage : développement cognitif, troubles du comportement et scolarisation: Outcome at 5 and 8 years of children born very preterm. *Archives de Pédiatrie*, *15*(5), 589-591. [https://doi.org/10.1016/S0929-693X\(08\)71843-8](https://doi.org/10.1016/S0929-693X(08)71843-8)
- Larson, M. J., Kaufman, D. A. S. et Perlstein, W. M. (2009). Neural time course of conflict adaptation effects on the Stroop task. *Neuropsychologia*, *47*(3), 663-670. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.013>
- Larsson, J. et Smith, A. T. (2012). fMRI repetition suppression: neuronal adaptation or stimulus expectation? *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *22*(3), 567-576. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr119>
- Lecanuet, J.-P., Granier-Deferre, C. et Schaal, B. (2004). 18. Les perceptions fœtales. Ontogenèse des systèmes et écologie fœtale. Dans *Nouveau traité de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent* (vol. 2e éd., p. 253-262). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.diatk.2004.01.0253>
- Lecanuet, J.-P. et Schaal, B. (2002). Sensory performances in the human foetus : a brief summary of research. *Intellectica*, *34*(1), 29-56. <https://doi.org/10.3406/intel.2002.1072>
- Lecendreux, M., Konofal, E. et Faraone, S. V. (2011). Prevalence of attention deficit hyperactivity disorder and associated features among children in France. *Journal of Attention Disorders*, *15*(6), 516-524. <https://doi.org/10.1177/1087054710372491>
- Leclercq, V., Jambaqué, I., Picard, A., Bricout, L. et Sieroff, E. (2006). Trouble du contrôle attentionnel et prématurité. *Revue de Neuropsychologie*, *16*(1), 42-64.
- Lee, C. S. C., Pei, J., Andrew, G., A Kerns, K. et Rasmussen, C. (2017). Effects of working memory training on children born preterm. *Applied Neuropsychology: Child*, *6*(4), 281-296. <https://doi.org/10.1080/21622965.2016.1161513>
- Lejeune, F., Audeoud, F., Marcus, L., Streri, A., Debillon, T. et Gentaz, E. (2010). The Manual Habituation and Discrimination of Shapes in Preterm Human Infants from 33 to 34+6 Post-Conceptional Age. *PLOS ONE*, *5*(2), e9108. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009108>
- Leonard, H. C., Bernardi, M., Hill, E. L. et Henry, L. A. (2015). Executive Functioning, Motor Difficulties, and Developmental Coordination Disorder. *Developmental Neuropsychology*, *40*(4), 201-215. <https://doi.org/10.1080/87565641.2014.997933>

- Lickliter, R. (2008). The growth of developmental thought: Implications for a new evolutionary psychology. *New Ideas in Psychology*, 26(3), 353-369. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2007.07.015>
- Lin, B., Liew, J. et Perez, M. (2019). Measurement of self-regulation in early childhood: Relations between laboratory and performance-based measures of effortful control and executive functioning. *Early Childhood Research Quarterly*, 47, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.10.004>
- Linsell, L., Johnson, S., Wolke, D., Morris, J., Kurinczuk, J. J. et Marlow, N. (2019). Trajectories of behavior, attention, social and emotional problems from childhood to early adulthood following extremely preterm birth: a prospective cohort study. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 28(4), 531-542. <https://doi.org/10.1007/s00787-018-1219-8>
- Loe, I. M., Heller, N. A. et Chatav, M. (2019). Behavior problems and executive function impairments in preterm compared to full term preschoolers. *Early Human Development*, 130, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2019.01.014>
- Lonergan, A., Doyle, C., Cassidy, C., MacSweeney Mahon, S., Roche, R. A. P., Boran, L. et Bramham, J. (2019). A meta-analysis of executive functioning in dyslexia with consideration of the impact of comorbid ADHD. *Journal of Cognitive Psychology*, 31(7), 725-749. <https://doi.org/10.1080/20445911.2019.1669609>
- López Hernández, A. M., Fernández, M. D. L. et Padilla Muñoz, E. M. (2022). Executive functions, child development and social functioning in premature preschoolers. A multi-method approach. *Cognitive Development*, 62, 101173. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2022.101173>
- Lotan, M. et Gold, C. (2009). Meta-analysis of the effectiveness of individual intervention in the controlled multisensory environment (Snoezelen®) for individuals with intellectual disability. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 34(3), 207-215. <https://doi.org/10.1080/13668250903080106>
- Ma, Z.-H., Lu, B., Li, X., Mei, T., Guo, Y.-Q., Yang, L., Wang, H., Tang, X.-Z., Ji, Z.-Z., Liu, J.-R., Xu, L.-Z., Yang, Y.-L., Cao, Q.-J., Yan, C.-G. et Liu, J. (2022). Atypicalities in the developmental trajectory of cortico-striatal functional connectivity in autism spectrum disorder. *Autism*, 26(5), 1108-1122. <https://doi.org/10.1177/13623613211041904>
- Machado, A. C. C. de P., Magalhães, L. de C., de Oliveira, S. R., Novi, S. L., Mesquita, R. C., de Miranda, D. M. et Bouzada, M. C. F. (2022). Can tactile reactivity in preterm born infants be explained by an immature cortical response to tactile stimulation in the first year? A pilot study. *Journal of Perinatology*, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41372-022-01536-w>
- Mackie, M.-A., Van Dam, N. T. et Fan, J. (2013). Cognitive control and attentional functions. *Brain and Cognition*, 82(3), 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.05.004>
- Maenner, M. J., Shaw, K. A., Bakian, A. V., Bilder, D. A., Durkin, M. S., Esler, A., Furnier, S. M., Hallas, L., Hall-Lande, J., Hudson, A., Hughes, M. M., Patrick, M., Pierce, K., Poynter, J. N.,

- Salinas, A., Shenouda, J., Vehorn, A., Warren, Z., Constantino, J. N., ... Cogswell, M. E. (2021). Prevalence and Characteristics of Autism Spectrum Disorder Among Children Aged 8 Years — Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2018. *MMWR Surveillance Summaries*, 70(11), 1-16. <https://doi.org/10.15585/mmwr.ss7011a1>
- Maitre, N. L., Key, A. P., Chorna, O. D., Slaughter, J. C., Matusz, P. J., Wallace, M. T. et Murray, M. M. (2017). The Dual Nature of Early-Life Experience on Somatosensory Processing in the Human Infant Brain. *Current Biology*, 27(7), 1048-1054. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.036>
- Male, A. G. et O'Shea, R. P. (2023). Attention is required for canonical brain signature of prediction error despite early encoding of the stimuli. *PLoS Biology*, 21(6), e3001866. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001866>
- Mammen, M. A., Moore, G. A., Scaramella, L. V., Reiss, D., Ganiban, J. M., Shaw, D. S., Leve, L. D. et Neiderhiser, J. M. (2015). Infant Avoidance During a Tactile Task Predicts Autism Spectrum Behaviors in Toddlerhood. *Infant Mental Health Journal*, 36(6), 575-587. <https://doi.org/10.1002/imhj.21539>
- Mangeot, S. D., Miller, L. J., McIntosh, D. N., McGrath-Clarke, J., Simon, J., Hagerman, R. J. et Goldson, E. (2001). Sensory modulation dysfunction in children with attention-deficit-hyperactivity disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 43(6), 399-406. <https://doi.org/10.1017/s0012162201000743>
- Marlow, N., Hennessy, E. M., Bracewell, M. A., Wolke, D., et EPICure Study Group. (2007). Motor and executive function at 6 years of age after extremely preterm birth. *Pediatrics*, 120(4), 793-804. <https://doi.org/10.1542/peds.2007-0440>
- Marlow, N., Wolke, D., Bracewell, M. A., Samara, M., et EPICure Study Group. (2005). Neurologic and developmental disability at six years of age after extremely preterm birth. *The New England Journal of Medicine*, 352(1), 9-19. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa041367>
- Marret, S., Chollat, C., de Quelen, R., Pinto Cardoso, G., Abily-Donval, L., Chadie, A., Torre, S., Vanhulle, C., Mellier, D., Charollais, A. et Ancel, P.-Y. (2015). Parcours et développement neurologique et comportemental de l'enfant prématuré. *Archives de Pédiatrie*, 22(2), 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2014.11.016>
- Marrocco, R. T. et Davidson, M. C. (1998). Neurochemistry of attention. Dans *The attentive brain* (p. 35-50). The MIT Press.
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A. et Hambrick, D. Z. (2010). The Relationship Between Working Memory Capacity and Executive Functioning: Evidence for a Common Executive Attention Construct. *Neuropsychology*, 24(2), 222-243. <https://doi.org/10.1037/a0017619>

- McClelland, M. M., Cameron, C. E., Connor, C. M., Farris, C. L., Jewkes, A. M. et Morrison, F. J. (2007). Links between behavioral regulation and preschoolers' literacy, vocabulary, and math skills. *Developmental Psychology*, *43*(4), 947-959. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.4.947>
- McClelland, M. M., Cameron, C. E., Duncan, R., Bowles, R. P., Acock, A. C., Miao, A. et Pratt, M. E. (2014). Predictors of early growth in academic achievement: the head-toes-knees-shoulders task. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00599>
- McClelland, M. M., Ponitz, C. C., Messersmith, E. E. et Tominey, S. (2010). Self-regulation: Integration of cognition and emotion. Dans *The handbook of life-span development, Vol 1: Cognition, biology, and methods* (p. 509-553). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470880166.hlsd001015>
- Medalia, A. et Lim, R. (2004). Treatment of Cognitive Dysfunction in Psychiatric Disorders. *Journal of Psychiatric Practice*®, *10*(1), 17.
- Meltzoff, A. N. et Borton, R. W. (1979). Intermodal matching by human neonates. *Nature*, *282*(5737), 403-404. <https://doi.org/10.1038/282403a0>
- Menghini, D., Finzi, A., Benassi, M., Bolzani, R., Facoetti, A., Giovagnoli, S., Ruffino, M. et Vicari, S. (2010). Different underlying neurocognitive deficits in developmental dyslexia: A comparative study. *Neuropsychologia*, *48*(4), 863-872. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.11.003>
- Menghini, D., Finzi, A., Carlesimo, G. A. et Vicari, S. (2011). Working memory impairment in children with developmental dyslexia: is it just a phonological deficit? *Developmental Neuropsychology*, *36*(2), 199-213. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549868>
- Menon, V. et Uddin, L. Q. (2010). Saliency, switching, attention and control: a network model of insula function. *Brain structure & function*, *214*(5-6), 655-667. <https://doi.org/10.1007/s00429-010-0262-0>
- Mikami, M., Hirota, T., Takahashi, M., Adachi, M., Saito, M., Koeda, S., Yoshida, K., Sakamoto, Y., Kato, S., Nakamura, K. et Yamada, J. (2021). Atypical Sensory Processing Profiles and Their Associations With Motor Problems In Preschoolers With Developmental Coordination Disorder. *Child Psychiatry & Human Development*, *52*(2), 311-320. <https://doi.org/10.1007/s10578-020-01013-5>
- Miyake, A. et Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(1), 8-14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. et Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>

- Molina, M. et Jouen, F. (1998). Modulation of the palmar grasp behavior in neonates according to texture property. *Infant Behavior and Development*, 21(4), 659-666. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(98\)90036-4](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(98)90036-4)
- Molina, M. et Jouen, F. (2001). Modulation of manual activity by vision in human newborns. *Developmental Psychobiology*, 38(2), 123-132. [https://doi.org/10.1002/1098-2302\(200103\)38:2<123::AID-DEV1005>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1098-2302(200103)38:2<123::AID-DEV1005>3.0.CO;2-O)
- Monette, S, Bigras, M. et Guay, M.-C. (2011). The role of the executive functions in school achievement at the end of Grade 1. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(2), 158-173. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.008>
- Monette, S. et Bigras, M. (2008). La mesure des fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 49(4), 323-341. <https://doi.org/10.1037/a0014000>
- Montangero, J. (2001). 5.1. Pourquoi tant de critiques à l'œuvre de Piaget ? *Intellectica*, 33(2), 245-253. <https://doi.org/10.3406/intel.2001.1649>
- Montessori, M. (2016). *Le manuel pratique de la méthode Montessori*. Desclée de Brouwer.
- Mori, H. et Kuniyoshi, Y. (2010). A human fetus development simulation: 2010 IEEE 9th International Conference on Development and Learning, ICDL-2010. *2010 IEEE 9th International Conference on Development and Learning, ICDL-2010 - Conference Program*, 82-87. <https://doi.org/10.1109/DEVLRN.2010.5578860>
- Mottron, L. et Burack, J. A. (2001). Enhanced perceptual functioning in the development of autism. Dans *The development of autism: Perspectives from theory and research* (p. 131-148). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Mottron, L., Dawson, M., Soulières, I., Hubert, B. et Burack, J. (2006). Enhanced perceptual functioning in autism: an update, and eight principles of autistic perception. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 36(1), 27-43. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0040-7>
- Mukerji, A., Shah, V. et Shah, P. S. (2015). Periventricular/Intraventricular Hemorrhage and Neurodevelopmental Outcomes: A Meta-analysis. *Pediatrics*, 136(6), 1132-1143. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-0944>
- Mulder, H., Pitchford, N. J., Hagger, M. S. et Marlow, N. (2009). Development of executive function and attention in preterm children: a systematic review. *Developmental Neuropsychology*, 34(4), 393-421. <https://doi.org/10.1080/87565640902964524>
- Mullane, J. C., Corkum, P. V., Klein, R. M., McLaughlin, E. N. et Lawrence, M. A. (2011). Alerting, Orienting, and Executive Attention in Children With ADHD. *Journal of Attention Disorders*, 15(4), 310-320. <https://doi.org/10.1177/1087054710366384>
- Mutreja, R., Craig, C. et O'Boyle, M. W. (2016). Attentional network deficits in children with autism spectrum disorder. *Developmental Neurorehabilitation*, 19(6), 389-397. <https://doi.org/10.3109/17518423.2015.1017663>

- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T. et 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>
- Ni, Y., O'Reilly, H., Johnson, S., Marlow, N. et Wolke, D. (2021). Health-Related Quality of Life from Adolescence to Adulthood Following Extremely Preterm Birth. *The Journal of Pediatrics*, 237, 227-236.e5. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2021.04.005>
- Nigg, J. T. (2017). Annual Research Review: On the relations among self-regulation, self-control, executive functioning, effortful control, cognitive control, impulsivity, risk-taking, and inhibition for developmental psychopathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 58(4), 361-383. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12675>
- Nir-Cohen, G., Kessler, Y. et Egner, T. (2020). Neural Substrates of Working Memory Updating. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(12), 2285-2302. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01625
- Noble, K. G., Engelhardt, L. E., Brito, N. H., Mack, L. J., Nail, E. J., Angal, J., Barr, R., Fifer, W. P. et Elliott, A. J. (2015). Socioeconomic Disparities in Neurocognitive Development in the First Two Years of Life. *Developmental psychobiology*, 57(5), 535-551. <https://doi.org/10.1002/dev.21303>
- Nordt, M., Hoehl, S. et Weigelt, S. (2016). The use of repetition suppression paradigms in developmental cognitive neuroscience. *Cortex*, 80, 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.002>
- Norman, D. A. et Shallice, T. (1980). *Attention to Action: Willed and Automatic Control of Behavior Technical Report No. 8006*.
- Olesen, P. J., Westerberg, H. et Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75-79. <https://doi.org/10.1038/nn1165>
- Orève, M.-J. et Speranza, M. (2015). Repérage et diagnostic précoces de l'enfant autiste: les outils cliniques. *Archives de Pédiatrie*, 22(5, Supplement 1), 177-178. [https://doi.org/10.1016/S0929-693X\(15\)30088-9](https://doi.org/10.1016/S0929-693X(15)30088-9)
- Otterman, D. L., Koopman-Verhoeff, M. E., White, T. J., Tiemeier, H., Bolhuis, K. et Jansen, P. W. (2019). Executive functioning and neurodevelopmental disorders in early childhood: a prospective population-based study. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13034-019-0299-7>
- Ozonoff, S., Rogers, S. J., Farnham, J. M. et Pennington, B. F. (1993). Can standard measures identify subclinical markers of autism? *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 23(3), 429-441. <https://doi.org/10.1007/BF01046049>
- Parenti, I., Rabaneda, L. G., Schoen, H. et Novarino, G. (2020). Neurodevelopmental Disorders: From Genetics to Functional Pathways. *Trends in Neurosciences*, 43(8), 608-621. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2020.05.004>

- Parr, T. et Friston, K. J. (2017). Working memory, attention, and salience in active inference. *Scientific Reports*, 7(1), 14678. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15249-0>
- Parush, S., Sohmer, H., Steinberg, A. et Kaitz, M. (2007). Somatosensory function in boys with ADHD and tactile defensiveness. *Physiology & Behavior*, 90(4), 553-558. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.11.004>
- Pelegrina, S., Capodiecì, A., Carretti, B. et Cornoldi, C. (2015). Magnitude Representation and Working Memory Updating in Children With Arithmetic and Reading Comprehension Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 48(6), 658-668. <https://doi.org/10.1177/0022219414527480>
- Peñalver, J. M. G., López-García, D., González-García, C., Aguado-López, B., Górriz, J. M. et Ruz, M. (2023). Top-down specific preparatory activations for Selective Attention and Perceptual Expectations. *NeuroImage*, 119960. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.119960>
- Petersen, S. E. et Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual Review of Neuroscience*, 35(1), 73-89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Piaget, J. (1975a). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Delachaux et Niestlé.
- Piaget, J. (1975b). *L'équilibration des structures cognitives: problème central du développement*. Presses universitaires de France.
- Piccardi, E. S., Begum Ali, J., Jones, E. J. H., Mason, L., Charman, T., Johnson, M. H., Gliga, T., Agyapong, M., Bazelmans, T., Dafner, L., Ersoy, M., Goodwin, A., Haartsen, R., Hendry, A., Holman, R., Kalwarowsky, S., Kolesnik, A., Lloyd-Fox, S., Pasco, G., ... BASIS/STAARS Team. (2021). Behavioural and neural markers of tactile sensory processing in infants at elevated likelihood of autism spectrum disorder and/or attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s11689-020-09334-1>
- Pierrat, V., Marchand-Martin, L., Marret, S., Arnaud, C., Benhammou, V., Cambonie, G., Debillon, T., Dufourg, M.-N., Gire, C., Goffinet, F., Kaminski, M., Lapillonne, A., Morgan, A. S., Rozé, J.-C., Twilhaar, S., Charles, M.-A. et Ancel, P.-Y. (2021). Neurodevelopmental outcomes at age 5 among children born preterm: EPIPAGE-2 cohort study. *BMJ*, 373, n741. <https://doi.org/10.1136/bmj.n741>
- Pillay, S., Duncan, M. et de Vries, P. J. (2021). Autism in the Western Cape province of South Africa: Rates, socio-demographics, disability and educational characteristics in one million school children. *Autism*, 25(4), 1076-1089. <https://doi.org/10.1177/1362361320978042>
- Pizzo, R., Urben, S., Linden, M. V. D., Borradori-Tolsa, C., Freschi, M., Forcada-Guex, M., Hüppi, P. et Barisnikov, K. (2010). Attentional networks efficiency in preterm children. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 16(1), 130-137. <https://doi.org/10.1017/S1355617709991032>

- Polanczyk, G., de Lima, M. S., Horta, B. L., Biederman, J. et 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>
- Ponitz, C. C., McClelland, M. M., Matthews, J. S. et Morrison, F. J. (2009). A structured observation of behavioral self-regulation and its contribution to kindergarten outcomes. *Developmental Psychology*, 45(3), 605-619. <https://doi.org/10.1037/a0015365>
- Ponnou, S. (2020). Prévalence, diagnostic et médication de l'hyperactivité/TDAH en France. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2020.08.018>
- Posner, M. I. (1975). Chapter 15 - Psychobiology of Attention. Dans M. S. Gazzaniga et C. Blakemore (dir.), *Handbook of Psychobiology* (p. 441-480). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-278656-3.50019-3>
- Posner, M. I. (2008). Measuring Alertness. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1129(1), 193-199. <https://doi.org/10.1196/annals.1417.011>
- Posner, M. I., Rothbart, M. K., Sheese, B. E. et Tang, Y. (2007). The anterior cingulate gyrus and the mechanism of self-regulation. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 391-395. <https://doi.org/10.3758/cabn.7.4.391>
- Posner, M.I., Rothbart, M. K. et Tang, Y. (2013). Developing self-regulation in early childhood. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(3-4), 107-110. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.09.001>
- Posner, M. I. et Rothbart, M. K. (2007). Research on Attention Networks as a Model for the Integration of Psychological Science. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085516>
- Posner, M. I., Rothbart, M. K. et Tang, Y. (2013). Developing self-regulation in early childhood. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(3), 107-110. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.09.001>
- Posner, M.I., Rothbart, M. K. et Voelker, P. (2016). Developing Brain Networks of Attention. *Current opinion in pediatrics*, 28(6), 720-724. <https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000413>
- Posner, M.I. et Petersen, S.E. (1990). The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13(1), 25-42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Pozuelos, J. P., Paz-Alonso, P. M., Castillo, A., Fuentes, L. J. et Rueda, M. R. (2014). Development of attention networks and their interactions in childhood. *Developmental Psychology*, 50(10), 2405-2415. <https://doi.org/10.1037/a0037469>
- Pozuelos, J.P., Combata, L. M., Abundis, A., Paz-Alonso, P. M., Conejero, Á., Guerra, S. et Rueda, M. R. (2019). Metacognitive scaffolding boosts cognitive and neural benefits following executive attention training in children. *Developmental Science*, 22(2), e12756. <https://doi.org/10.1111/desc.12756>
- Prevor, M. B. et Diamond, A. (2005). Color-object interference in young children: A Stroop effect in children 3½-6½ years old. *Cognitive Development*, 20(2), 256-278. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2005.04.001>

- Provasi, J., Anderson, D. I. et Barbu-Roth, M. (2014). Rhythm perception, production, and synchronization during the perinatal period. *Frontiers in Psychology*, 5, 1048. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01048>
- Qin, B., Wang, L., Cai, J., Li, T. et Zhang, Y. (2022). Functional Brain Networks in Preschool Children With Autism Spectrum Disorders. *Frontiers in Psychiatry*, 13, 896388. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.896388>
- Ramos, A. A., Hamdan, A. C. et Machado, L. (2020). A meta-analysis on verbal working memory in children and adolescents with ADHD. *The Clinical Neuropsychologist*, 34(5), 873-898. <https://doi.org/10.1080/13854046.2019.1604998>
- Rauss, K. et Pourtois, G. (2013). What is Bottom-Up and What is Top-Down in Predictive Coding? *Frontiers in Psychology*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00276>
- Raver, C. C., Blair, C. et Willoughby, M. (2013). Poverty as a predictor of 4-year-olds' executive function: New perspectives on models of differential susceptibility. *Developmental Psychology*, 49(2), 292-304. <https://doi.org/10.1037/a0028343>
- Rees, C. (2007). Childhood attachment. *The British Journal of General Practice*, 57(544), 920-922.
- Renner, P., Grofer Klinger, L. et Klinger, M. R. (2006). Exogenous and Endogenous Attention Orienting in Autism Spectrum Disorders. *Child Neuropsychology*, 12(4-5), 361-382. <https://doi.org/10.1080/09297040600770753>
- Reynold de Seresin, M., Roy, A., Theveniaut, C., Le Goff, J., Chopin, C., Rouger, V., Roze, J.-C., Flamant, C. et Muller, J.-B. (2023). Assessing of executive functions in daily life in preterm children aged 3–4 years old from the “Behavior Rating Inventory of Executive Function—Preschool version” questionnaire. *Frontiers in Pediatrics*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fped.2023.999100>
- Rhoades, B. L., Warren, H. K., Domitrovich, C. E. et Greenberg, M. T. (2011). Examining the link between preschool social–emotional competence and first grade academic achievement: The role of attention skills. *Early Childhood Research Quarterly*, 26(2), 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2010.07.003>
- Riggins, T. et Scott, L. S. (2020). P300 development from infancy to adolescence. *Psychophysiology*, 57(7), e13346. <https://doi.org/10.1111/psyp.13346>
- Roca, J., Castro, C., López-Ramón, M. F. et Lupiáñez, J. (2011). Measuring vigilance while assessing the functioning of the three attentional networks: the ANTI-Vigilance task. *Journal of Neuroscience Methods*, 198(2), 312-324. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2011.04.014>
- Rochat, P. (1987). Mouthing and grasping in neonates: Evidence for the early detection of what hard or soft substances afford for action. *Infant Behavior and Development*, 10(4), 435-449. [https://doi.org/10.1016/0163-6383\(87\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0163-6383(87)90041-5)
- Roche-Labarbe, N., Fenoglio, A., Radhakrishnan, H., Kocienski-Filip, M., Carp, S. A., Dubb, J., Boas, D. A., Grant, P. E. et Franceschini, M. A. (2014). Somatosensory evoked changes in cerebral

- oxygen consumption measured non-invasively in premature neonates. *NeuroImage*, 85, 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.01.035>
- Rolland, A.-C., Aupetit, L., Boissou-Bonnet, C. et Bednarek, N. (2006). La part du rêve dans le dépistage précoce. *Perspectives Psy*, 45(1), 53-58.
- Ronca, A. E. et Alberts, J. R. (2016). Fetal and birth experiences: Proximate effects, developmental consequences, epigenetic legacies. Dans *Fetal development: Research on brain and behavior, environmental influences, and emerging technologies* (p. 15-42). Springer Science + Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22023-9_2
- Roncadin, C., Pascual-Leone, J., Rich, J. B. et Dennis, M. (2007). Developmental relations between working memory and inhibitory control. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 13(1), 59-67. <https://doi.org/10.1017/S1355617707070099>
- Rose, S. A., Schmidt, K. et Bridger, W. H. (1976). Cardiac and behavioral responsivity to tactile stimulation in premature and full-term infants. *Developmental Psychology*, 12, 311-320. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.12.4.311>
- Rothbart, M. K., Ahadi, S. A., Hershey, K. L. et Fisher, P. (2001). Investigations of temperament at three to seven years: the Children's Behavior Questionnaire. *Child Development*, 72(5), 1394-1408. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00355>
- Rothbart, M. K., Ellis, L. K., Rosario Rueda, M. et Posner, M. I. (2003). Developing Mechanisms of Temperamental Effortful Control. *Journal of Personality*, 71(6), 1113-1144. <https://doi.org/10.1111/1467-6494.7106009>
- Rothbart, M. K. et Rueda, M. R. (2005). The Development of Effortful Control. Dans U. Mayr, E. Awh et S. W. Keele (dir.), *Developing individuality in the human brain: A tribute to Michael I. Posner*. (p. 167-188). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/11108-009>
- Rothbart, M. K., Sheese, B. E. et Posner, M. I. (2007). Executive Attention and Effortful Control: Linking Temperament, Brain Networks, and Genes. *Child Development Perspectives*, 1(1), 2-7. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2007.00002.x>
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., Aster, M. von, Klaver, P. et Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 39(1), 417-422. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.045>
- Roy, A et Le Gall, D. (2018). Adaptation et validation en français de l'Inventaire comportemental des fonctions exécutives version préscolaire (BRIEF-P: Behavior Rating Inventory of Executive Function - Preschool version). *Paris : HOGREFE*.
- Roy, A. (2015). Approche neuropsychologique des fonctions exécutives de l'enfant : état des lieux et éléments de prospective. *Revue de neuropsychologie*, 7(4), 245-256. <https://doi.org/10.1684/nrp.2015.0357>
- Roy, A. (2018). Chapitre 2. Les troubles cognitifs chez l'enfant. Dans *Rééducation cognitive chez l'enfant* (p. 87-143). De Boeck Supérieur. <https://doi.org/10.3917/dbu.segui.2018.01.0087>

- Roy, A., Le Gall, D., Roulin, J.-L. et Fournet, N. (2020). Un nouveau dispositif d'évaluation des fonctions exécutives chez l'enfant : la batterie FÉE. *ANAE : Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez l'Enfant*, (167), 393-402.
- Roy, A., Lodenos, V., Fournet, N., Le Gall, D. et Roulin, J.-L. (2017). Le syndrome dysexécutif chez l'enfant : entre avancées scientifiques et questionnements. *A.N.A.E.*, 146, 27-38.
- Royeen, C. B. (1985). Domain specifications of the construct tactile defensiveness. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 39(9), 596-599. <https://doi.org/10.5014/ajot.39.9.596>
- Rubia, K. (2011). "Cool" Inferior Frontostriatal Dysfunction in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Versus "Hot" Ventromedial Orbitofrontal-Limbic Dysfunction in Conduct Disorder: A Review. *Biological Psychiatry*, 69(12), e69-e87. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.09.023>
- Rubia, K., Smith, A. B., Halari, R., Matsukura, F., Mohammad, M., Taylor, E. et Brammer, M. J. (2009). Disorder-specific dissociation of orbitofrontal dysfunction in boys with pure conduct disorder during reward and ventrolateral prefrontal dysfunction in boys with pure ADHD during sustained attention. *The American Journal of Psychiatry*, 166(1), 83-94. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2008.08020212>
- Rueda, M. R., Checa, P. et Cómbita, L. M. (2012). Enhanced efficiency of the executive attention network after training in preschool children: Immediate changes and effects after two months. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, S192-S204. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.004>
- Rueda, M. R., Checa, P. et Rothbart, M. K. (2010). Contributions of Attentional Control to Socioemotional and Academic Development. *Early Education & Development*, 21(5), 744-764. <https://doi.org/10.1080/10409289.2010.510055>
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P. et Posner, M. I. (2004a). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, 42(8), 1029-1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P. et Posner, M. I. (2004b). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, 42(8), 1029-1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Rueda, M. R., Moyano, S. et Rico-Picó, J. (2021). Attention: The grounds of self-regulated cognition. *WIREs Cognitive Science*, n/a(n/a), e1582. <https://doi.org/10.1002/wcs.1582>
- Rueda, M. R., Posner, M. I. et Rothbart, M. K. (2005). The Development of Executive Attention: Contributions to the Emergence of Self-Regulation. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 573-594. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_2

- Rueda, M. R., Posner, M. I., Rothbart, M. K. et Davis-Stober, C. P. (2004). Development of the time course for processing conflict: an event-related potentials study with 4 year olds and adults. *BMC Neuroscience*, 13.
- Ruff, H. A. et Rothbart, M. K. (1966). *Attention in Early Development: Themes and Variations*. Oxford University Press.
- Rutiku, R., Martin, M., Bachmann, T. et Aru, J. (2015). Does the P300 reflect conscious perception or its consequences? *Neuroscience*, 298, 180-189. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.04.029>
- Saal, H. P. et Bensmaia, S. J. (2014). Touch is a team effort: interplay of submodalities in cutaneous sensibility. *Trends in Neurosciences*, 37(12), 689-697. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.08.012>
- Sabag, M. et Geva, R. (2022). Hyper and hypo attention networks activations affect social development in children with autism spectrum disorder. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2022.902041>
- Saint-Georges, C., Guinchat, V., Chamak, B., Apicella, F., Muratori, F. et Cohen, D. (2013). Signes précoces d'autisme : d'où vient-on ? Où va-t-on ? *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 61(7), 400-408. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2013.05.005>
- Sansavini, A., Libertus, K., Guarini, A., Libertus, M. E., Benassi, M. et Iverson, J. M. (2021). Editorial: Understanding Trajectories and Promoting Change From Early to Complex Skills in Typical and Atypical Development: A Cross-Population Approach. *Frontiers in Psychology*, 12, 647464. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.647464>
- Santana, A. N. de, Roazzi, A. et Nobre, A. P. M. C. (2022). The relationship between cognitive flexibility and mathematical performance in children: A meta-analysis. *Trends in Neuroscience and Education*, 28, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2022.100179>
- Scerif, G. et Steele, A. (2011). Neurocognitive development of attention across genetic syndromes: inspecting a disorder's dynamics through the lens of another. *Progress in Brain Research*, 189, 285-301. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53884-0.00030-0>
- Scheinost, D., Chang, J., Brennan-Wydra, E., Lacadie, C., Constable, R. T., Chawarska, K. et Ment, L. R. (2022, 28 septembre). Developmental trajectories of the default mode, executive control, and salience networks from the third trimester through the newborn period. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2022.09.27.509687>
- Schimmelpfennig, J., Topczewski, J., Zajkowski, W. et Jankowiak-Siuda, K. (2023). The role of the salience network in cognitive and affective deficits. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2023.1133367>
- Schmidt, H., Daseking, M., Gawrilow, C., Karbach, J. et Kerner auch Koerner, J. (2022). Self-regulation in preschool: Are executive function and effortful control overlapping constructs? *Developmental Science*, n/a(n/a), e13272. <https://doi.org/10.1111/desc.13272>

- Schröger, E., Marzecová, A. et SanMiguel, I. (2015). Attention and prediction in human audition: a lesson from cognitive psychophysiology. *European Journal of Neuroscience*, 41(5), 641-664. <https://doi.org/10.1111/ejn.12816>
- Schubotz, R. I. (2015). Prediction and Expectation. Dans *Brain Mapping* (p. 295-302). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397025-1.00247-5>
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., Reiss, A. L. et Greicius, M. D. (2007). Dissociable Intrinsic Connectivity Networks for Salience Processing and Executive Control. *Journal of Neuroscience*, 27(9), 2349-2356. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5587-06.2007>
- Segond, H. (2008). Le Toucher en développement Perception tactile et continuité transnatale. Dans *Cognition, Santé et Vie Quotidienne* (G. Chasseigne, vol. 1, p. 35). Publibook Université.
- Segond, H. (2015). *Le Toucher en Développement: Latéralité, Cécité, Autisme; Des Activités Perceptives au Soin*. Éditions universitaires européennes.
- Sheese, B. E., Rothbart, M. K., Posner, M. I., White, L. K. et Fraundorf, S. H. (2008). Executive attention and self-regulation in infancy. *Infant Behavior and Development*, 31(3), 501-510. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2008.02.001>
- Shum, D., Neulinger, K., O'Callaghan, M. et Mohay, H. (2008). Attentional problems in children born very preterm or with extremely low birth weight at 7-9 years. *Archives of Clinical Neuropsychology: The Official Journal of the National Academy of Neuropsychologists*, 23(1), 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.acn.2007.08.006>
- Siegler, R. S. (1989). Mechanisms of Cognitive Development. *Annual Review of Psychology*, 40(1), 353-379. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.40.020189.002033>
- Simon, V., Czobor, P., Bálint, S., Mészáros, A. et Bitter, I. (2009). Prevalence and correlates of adult attention-deficit hyperactivity disorder: meta-analysis. *The British Journal of Psychiatry: The Journal of Mental Science*, 194(3), 204-211. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.107.048827>
- Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., Diamond, S. P. et Held, R. M. (2014). Autism as a disorder of prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(42), 15220-15225. <https://doi.org/10.1073/pnas.1416797111>
- Smith-Spark, J. H. et Fisk, J. E. (2007). Working memory functioning in developmental dyslexia. *Memory (Hove, England)*, 15(1), 34-56. <https://doi.org/10.1080/09658210601043384>
- Smout, C. A., Tang, M. F., Garrido, M. I. et Mattingley, J. B. (2019). Attention promotes the neural encoding of prediction errors. *PLOS Biology*, 17(2), e2006812. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006812>
- Snyder, E. H., Davis, D. W., Burns, B. M. et Robinson, J. B. (2007). Examining attention networks in preschool children born with very low birth weights. *Journal of Early Childhood and Infant Psychology*, 3, 185-203.

- Sonuga-Barke, E. J. S. (2002). Psychological heterogeneity in AD/HD—a dual pathway model of behaviour and cognition. *Behavioural Brain Research*, *130*(1), 29-36. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(01\)00432-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(01)00432-6)
- Sonuga-Barke, E. J. S. (2005). Causal models of attention-deficit/hyperactivity disorder: from common simple deficits to multiple developmental pathways. *Biological Psychiatry*, *57*(11), 1231-1238. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2004.09.008>
- Sonuga-Barke, E. J. S., Bitsakou, P. et Thompson, M. (2010). Beyond the Dual Pathway Model: Evidence for the Dissociation of Timing, Inhibitory, and Delay-Related Impairments in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, *49*(4), 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2009.12.018>
- Sonuga-Barke, E. J. S. et Halperin, J. M. (2010). Developmental phenotypes and causal pathways in attention deficit/hyperactivity disorder: potential targets for early intervention? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *51*(4), 368-389. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2009.02195.x>
- Sonuga-Barke, E. J. S., Taylor, E., Sembi, S. et Smith, J. (1992). Hyperactivity and Delay Aversion—I. The Effect of Delay on Choice. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *33*(2), 387-398. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1992.tb00874.x>
- Sørensen, L., Plessen, K. J., Adolfsdottir, S. et Lundervold, A. J. (2014). The specificity of the Stroop interference score of errors to ADHD in boys. *Child Neuropsychology*, *20*(6), 677-691. <https://doi.org/10.1080/09297049.2013.855716>
- Spelke, E. S. (1998). Nativism, empiricism, and the origins of knowledge. *Infant Behavior & Development*, *21*, 181-200. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(98\)90002-9](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(98)90002-9)
- Srinivas Jois, R. (2018). Neurodevelopmental outcome of late-preterm infants: A pragmatic review. *Australian Journal of General Practice*, *47*(11), 776-781.
- Summerfield, C., Trittschuh, E. H., Monti, J. M., Mesulam, M. M. et Egner, T. (2008). Neural repetition suppression reflects fulfilled perceptual expectations. *Nature Neuroscience*, *11*(9), 1004-1006. <https://doi.org/10.1038/nn.2163>
- Summerfield, C., Wyart, V., Mareike Johnen, V. et de Gardelle, V. (2011). Human Scalp Electroencephalography Reveals that Repetition Suppression Varies with Expectation. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2011.00067>
- Tam, V., Gelsomini, M. et Garzotto, F. (2017, 20 mars). *Polipo: a Tangible Toy for Children with Neurodevelopmental Disorders*. TEI '17: Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Yokohama Japan (p. 11-20). <https://doi.org/10.1145/3024969.3025006>
- Taran, N., Farah, R., DiFrancesco, M., Altaye, M., Vannest, J., Holland, S., Rosch, K., Schlaggar, B. L. et Horowitz-Kraus, T. (2022). The role of visual attention in dyslexia: Behavioral and

- neurobiological evidence. *Human Brain Mapping*, 43(5), 1720-1737. <https://doi.org/10.1002/hbm.25753>
- Taurines, R., Schwenck, C., Westerwald, E., Sachse, M., Siniatchkin, M. et Freitag, C. (2012). ADHD and autism: differential diagnosis or overlapping traits? A selective review. *ADHD Attention Deficit and Hyperactivity Disorders*, 4(3), 115-139. <https://doi.org/10.1007/s12402-012-0086-2>
- Taylor, H. G. et Clark, C. A. C. (2016). Executive function in children born preterm: Risk factors and implications for outcome. *Seminars in Perinatology*, 40(8), 520-529. <https://doi.org/10.1053/j.semperi.2016.09.004>
- Thomas, A. et Tazouti, Y. (2021). Links between early literacy and early numeracy during preschool education in France. *Education 3-13*, 0(0), 1-13. <https://doi.org/10.1080/03004279.2021.1977371>
- Thomas, M. S. C., Annaz, D., Ansari, D., Scerif, G., Jarrold, C. et Karmiloff-Smith, A. (2009). Using Developmental Trajectories to Understand Developmental Disorders. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 52(2), 336-358. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2009/07-0144\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2009/07-0144))
- Thomas, M. S. C. et Baughman, F. D. (2014). Neuroconstructivism: Understanding typical and atypical developmental trajectories. *Enfance*, 3(3), 205-236.
- Thompson, P. A., Hulme, C., Nash, H. M., Gooch, D., Hayiou-Thomas, E. et Snowling, M. J. (2015). Developmental dyslexia: predicting individual risk. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 56(9), 976-987. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12412>
- Thompson, R. F. et Spencer, W. A. (1966). Habituation: A model phenomenon for the study of neuronal substrates of behavior. *Psychological Review*, 73(1), 16-43. <https://doi.org/10.1037/h0022681>
- Tiego, J., Bellgrove, M. A., Whittle, S., Pantelis, C. et Testa, R. (2020). Common mechanisms of executive attention underlie executive function and effortful control in children. *Developmental Science*, 23(3), e12918. <https://doi.org/10.1111/desc.12918>
- Tiego, J., Testa, R., Bellgrove, M. A., Pantelis, C. et Whittle, S. (2018). A Hierarchical Model of Inhibitory Control. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2018.01339>
- Torchin, H. et Ancel, P.-Y. (2016). Épidémiologie et facteurs de risque de la prématurité. *Journal de Gynécologie Obstétrique et Biologie de la Reproduction*, 45(10), 1213-1230. <https://doi.org/10.1016/j.jgyn.2016.09.013>
- Twilhaar, E. S., Pierrat, V., Marchand-Martin, L., Benhammou, V., Kaminski, M. et Ancel, P.-Y. (2021). Profiles of Functioning in 5.5-Year-Old Very Preterm Born Children in France: The EPIPAGE-2 Study. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2021.09.001>
- Uddin, L. Q. (2016). *Saliency network of the human brain*. Academic Press is an imprint of Elsevier.

- Uddin, L. Q. (2017). Salience Network Across the Life Span. Dans *Salience Network of the Human Brain* (p. 17-21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804593-0.00004-7>
- Uddin, L. Q., Supekar, K. S., Ryali, S. et Menon, V. (2011). Dynamic Reconfiguration of Structural and Functional Connectivity Across Core Neurocognitive Brain Networks with Development. *Journal of Neuroscience*, *31*(50), 18578-18589. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4465-11.2011>
- Unwin, K. L., Powell, G. et Jones, C. R. (2022). The use of Multi-Sensory Environments with autistic children: Exploring the effect of having control of sensory changes. *Autism*, *26*(6), 1379-1394. <https://doi.org/10.1177/13623613211050176>
- Valeri, G. et Speranza, M. (2009). Modèles neuropsychologiques dans l'autisme et les troubles envahissants du développement. *Développements*, *1*(1), 34-48. <https://doi.org/10.3917/devel.001.0034>
- Van de Cruys, S., Evers, K., Van der Hallen, R., Van Eylen, L., Boets, B., de-Wit, L. et Wagemans, J. (2014). Precise minds in uncertain worlds: predictive coding in autism. *Psychological Review*, *121*(4), 649-675. <https://doi.org/10.1037/a0037665>
- Vandierendonck, A. (2016). A Working Memory System With Distributed Executive Control. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, *11*(1), 74-100. <https://doi.org/10.1177/1745691615596790>
- van Laarhoven, T., Stekelenburg, J. J., Eussen, M. L. et Vroomen, J. (2020). Atypical visual-auditory predictive coding in autism spectrum disorder: Electrophysiological evidence from stimulus omissions. *Autism*, *24*(7), 1849-1859. <https://doi.org/10.1177/1362361320926061>
- Varvara, P., Varuzza, C., Sorrentino, A. C. P., Vicari, S. et Menghini, D. (2014). Executive functions in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 120. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00120>
- Vasiļonoks, A., Zīle, I. et Folkmanis, V. (2018). Efficiency of Multisensoric Therapy in Autism Spectrum Disorder Patients. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences.*, *72*(3), 193-195. <https://doi.org/10.2478/prolas-2018-0022>
- Viterbori, P., Usai, M. C., Traverso, L. et De Franchis, V. (2015). How preschool executive functioning predicts several aspects of math achievement in Grades 1 and 3: A longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, *140*, 38-55. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.06.014>
- Vlaeminck, F., Vermeirsch, J., Verhaeghe, L., Warreyn, P. et Roeyers, H. (2020). Predicting cognitive development and early symptoms of autism spectrum disorder in preterm children: The value of temperament and sensory processing. *Infant Behavior and Development*, *59*, 101442. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2020.101442>
- Wacongne, C., Labyt, E., van Wassenhove, V., Bekinschtein, T., Naccache, L. et Dehaene, S. (2011). Evidence for a hierarchy of predictions and prediction errors in human cortex. *Proceedings of*

- the National Academy of Sciences*, 108(51), 20754-20759.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1117807108>
- Walani, S. R. (2020). Global burden of preterm birth. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 150(1), 31-33. <https://doi.org/10.1002/ijgo.13195>
- Wechsler, D. (1991). *WISC-III: Wechsler Intelligence Scale for Children: Manual*. Psychological Corporation.
- Weiss, S. M., Meltzoff, A. N. et Marshall, P. J. (2018). Neural measures of anticipatory bodily attention in children: Relations with executive function. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 34, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.08.002>
- Wendland, J., Gautier, A.-C., Wolff, M., Brisson, J. et Adrien, J.-L. (2010). Retrait relationnel et signes précoces d'autisme : étude préliminaire à partir de films familiaux, Summary. *Devenir*, 22(1), 51-72. <https://doi.org/10.3917/dev.101.0051>
- West, R. (2003). Neural correlates of cognitive control and conflict detection in the Stroop and digit-location tasks. *Neuropsychologia*, 41(8), 1122-1135. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(02\)00297-x](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(02)00297-x)
- Wickremasinghe, A. C., Rogers, E. E., Johnson, B. C., Shen, A., Barkovich, A. J. et Marco, E. J. (2013). Children born prematurely have atypical Sensory Profiles. *Journal of Perinatology*, 33(8), 631-635. <https://doi.org/10.1038/jp.2013.12>
- Wiebe, S. A., Sheffield, T., Nelson, J. M., Clark, C. A. C., Chevalier, N. et Espy, K. A. (2011). The structure of executive function in 3-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 436-452. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008>
- Wolke, D., Johnson, S. et Mendonça, M. (2019). The Life Course Consequences of Very Preterm Birth. *Annual Review of Developmental Psychology*, 1(1), 69-92. <https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-121318-084804>
- Woythaler, M. (2019). Neurodevelopmental outcomes of the late preterm infant. *Seminars in Fetal & Neonatal Medicine*, 24(1), 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2018.10.002>
- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H. et Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development: typical developmental trends. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(4), 561-575. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00145>
- Yeniad, N., Malda, M., Mesman, J., van IJendoorn, M. H. et Pieper, S. (2013). Shifting ability predicts math and reading performance in children: A meta-analytical study. *Learning and Individual Differences*, 23, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.10.004>
- Zablotsky, B., Black, L. I. et Blumberg, S. J. (2017). Estimated Prevalence of Children With Diagnosed Developmental Disabilities in the United States, 2014-2016. *NCHS Data Brief*, (291), 1-8.
- Zeidan, J., Fombonne, E., Scolah, J., Ibrahim, A., Durkin, M. S., Saxena, S., Yusuf, A., Shih, A. et Elsabbagh, M. (2022). Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research*, 15(5), 778-790. <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

Références bibliographiques

- Zelazo, P. D. (2006). The Dimensional Change Card Sort (DCCS): a method of assessing executive function in children. *Nature Protocols*, 1(1), 297-301. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.46>
- Zelazo, P. D., Carlson, S. M. et Kesek, A. (2008). The development of executive function in childhood. Dans *Handbook of developmental cognitive neuroscience, 2nd ed* (p. 553-574). Boston Review.
- Zelazo, P. D., Müller, U., Frye, D., Marcovitch, S., Argitis, G., Boseovski, J., Chiang, J. K., Hongwanishkul, D., Schuster, B. V. et Sutherland, A. (2003). The development of executive function in early childhood. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 68(3), vii-137. <https://doi.org/10.1111/j.0037-976x.2003.00260.x>
- Zhou, Q., Chen, S. H. et Main, A. (2012). Commonalities and Differences in the Research on Children's Effortful Control and Executive Function: A Call for an Integrated Model of Self-Regulation: Effortful Control and Executive Function. *Child Development Perspectives*, 6(2), 112-121. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00176.x>
- Zoenen, D. et Delvenne, V. (2018). Treatment of sensory information in neurodevelopmental disorders. *Revue Medicale De Bruxelles*, 39(1), 29-34. <https://doi.org/10.30637/2018.17-073>
- Zwaigenbaum, L., Bryson, S. et Garon, N. (2013). Early identification of autism spectrum disorders. *Behavioural Brain Research*, 251(Supplement C), 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.04.004>

Annexes

Liste des annexes

| | |
|--|-----|
| Annexe 1 | 206 |
| Revue de littérature publiée dans la revue <i>Wire's Cognitive Science</i> | |
| Annexe 2 | 219 |
| Flyers de l'étude MEDiATE | |
| Annexe 3 | 223 |
| Questionnaire BRIEF-P | |
| Annexe 4 | 225 |
| Extrait du Profil Sensoriel de Dunn (section liée au traitement sensoriel tactile) | |
| Annexe 5 | 226 |
| Guide d'administration du protocole HTKS (Blandine Hubert, 2015) | |
| Annexe 6 | 233 |
| Planches expérimentales et grille de cotation du Stroop-animaux | |

Tactile sensory processing as a precursor of executive attention: Toward early detection of attention impairments and neurodevelopmental disorders

Marie Anquetil¹  | Nadège Roche-Labarbe²  | Sandrine Rossi¹ 

¹Normandie Université, UNICAEN, LPCN, Caen, France

²Normandie Université, UNICAEN, INSERM, COMETE, Caen, France

Correspondence

Marie Anquetil, Normandie Université, UNICAEN, LPCN, 14000 Caen, France.
Email: marie.anquetil@unicaen.fr

Nadège Roche-Labarbe, Normandie Université, UNICAEN, INSERM, COMETE, Caen, France.
Email: nadege.roche@unicaen.fr

Funding information

Région Normandie, Grant/Award Number: PhD grant

Edited by: Baojuan Li, Editor

Abstract

Recent studies in developmental neuroscience tend to show the existence of neural attention networks from birth. Their construction is based on the first sensory experiences that allow us to learn the patterns of the world surrounding us and preserve our limited attentional resources. Touch is the first sensory modality to develop, although it is still little studied in developmental psychology in contrast to distal modalities such as audition or vision. Atypical tactile sensory processing at an early age could predict later attention dysfunction, both of them being part of the symptomatology of neurodevelopmental disorders (NDD). We review the state of knowledge on tactile sensory processing and its links with attention, executive attention (EA) in particular, and propose that abnormal tactile sensory processing at an early age could provide markers of EA dysfunctions, contributing to the early detection of NDD.

This article is categorized under:

Psychology > Attention

KEYWORDS

attention networks, executive attention, neurodevelopmental disorders, sensory processing, tactile modality

1 | INTRODUCTION

Humans first experience the world through sensory perception, long before birth. During the first weeks of life, sensory perception is actively used by the newborn and infant to make sense of the world, building the first cognitive processes. The tactile modality is the first sense to develop and is the foundation of sensory development (Bremner & Spence, 2017). According to the neuroconstructivist framework, early sensory experiences constrain the construction of brain networks which develop considerably during the first years of life (Karmiloff-Smith, 2009). Variability in perceptual skills at an early age, therefore, affects neural networks underlying attention systems (Rohr et al., 2018) and predicts later cognitive development (Bertenthal & Longo, 2002). Atypical sensory profiles, particularly affecting somesthetic senses, are a frequent feature of neurodevelopmental disorders (NDD) (Casio, 2010).

Executive attention (EA) is a cognitive construct part of the three attentional networks modeled by Posner and Petersen (1990) and necessary to executive functions (EF), formed by different cognitive processes like inhibition and interference control, cognitive flexibility, and updating in particular (Diamond, 2013). There is increasing interest in

the early development of EF because they are critical for school achievement, and because executive impairment is also a common feature of NDD (Ozonoff & Jensen, 1999).

NDD are characterized by developmental impairments in cognitive, motor, affective and social skills. They include various disorders such as attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD), autistic spectrum disorder (ASD), communication disorders (CD), intellectual disability (ID), learning disabilities (LD), and motor disorders (MD). A systematic review by Francés et al. (2022) reports the following worldwide incidence rates: ADHD, 5%–11%; ASD, 0.70%–3%; CD, 1%–3.42%; ID, 0.63%; LD, 3%–10%; and MD, 0.76%–17%. In European countries such as Spain, the study of Bosch et al. (2021) reports the following incidence rates: ADHD, 9.92%; ASD, 0.70%; CD, 1.05%; ID, 0.63%; LD, 10.0%; and MD, 0.76%. In the United States, the data show an increase in the overall prevalence of disorders between 2014 and 2016 (Zablotsky et al., 2017). The authors also point out the variability of prevalence rates depending on the pathology, the population, and also on the resources available to clinicians for diagnosis.

One of the global public health challenges is to better understand the emergence of NDD to propose early detection and remediation programs (Ozonoff, 2015). Although there is extensive knowledge of the many environmental risk factors for NDD (Arpino et al., 2010; De Felice et al., 2015; Martens & van Loo, 2007) abnormal brain development is often reported as a vulnerability to these subsequent risk factors and precedes clinical impairment (Jeste, 2015). We propose that atypical tactile perception at an early age puts children at risk of developing atypical attention, evolving into dysexecutive syndromes at a later age, these deficits being aspects of the same pathological process in NDD. We review research on tactile sensory processing and EA in young children and consider new research paradigms integrating these two components to provide new markers of EA deficit. Such markers could be used for the early identification of children at risk of NDD and other cognitive impairment, and to design new early interventions.

2 | SOMATOSENSORY PROCESSING IS THE FOUNDATION OF COGNITIVE DEVELOPMENT

The somatosensory system collects all the information that we receive from our tactile skin receptors (touch, pain, temperature) and proprioceptive receptors in joints and ligaments (head and body position and movement). Touch is the first sensory modality to develop and the first sensations we experience are tactile (Bremner & Spence, 2017). As early as 7 weeks of gestation, the first tactile receptors are mature and somatosensory functions quickly follow. Touch is considered the foundation upon which other perceptive, cognitive, motor, and affective functions develop (Ardiel & Rankin, 2010; Dumont et al., 2018; Lickliter, 2011). Because of this sensory scaffolding function, touch is believed to play a critical role in attachment (Weiss et al., 2000) and early sensory-motor development (Fearon et al., 2002), the representation of our own body in space (Serino & Haggard, 2010), and to be the precursor of verbal communication (Hertenstein et al., 2006). A recent review of the importance of touch for all aspects of development can be found in Cascio et al. (2019). Despite the relevance of tactile processing for understanding both typical and pathological developmental courses, early somatosensory development remains poorly exploited in developmental cognitive science, compared with the later-developing modalities of audition and vision. In this section, we address how somatosensory processing, and particularly prediction, is related to attention development.

2.1 | Somatosensory processing and prediction

One of the fundamental mechanisms of cognitive development is sensory prediction. The brain constantly extracts information from its environment to develop internal mental models that will serve to predict future sensory inputs (Friston, 2005). Predictions optimize our cognitive and behavioral resources by anticipating changes in our environment and preparing appropriate responses, resulting in a cognitive and motor economy (Schubotz, 2015). The infant's brain is highly predictive from a young age and prediction guides sensory processing and learning (Baek et al., 2020). From the age of 2 months, infants can anticipate the caregiver's actions, for example when being picked up, and adjust their posture to enter into interaction (Reddy et al., 2013). In a recent study, Dumont et al. (2022) showed that premature neonates can predict a tactile stimulus and that the somatosensory cortex activity is modulated according to the temporal regularity of the stimulation sequence, similar to what has been described in adults (van Ede et al., 2014). Somatosensory representations support body representations (Bremner & Spence, 2017), therefore, they are critical for the development of motor planning and motor control (Assaiante et al., 2014). Sensory prediction then develops in

distal modalities such as auditory in 6 months old (Emberson et al., 2019) and visual in 12 months old (Kouider et al., 2015). Impaired tactile prediction may thus impair both sensory prediction in later developing distal modalities and motor development. In support of this hypothesis, experimental data show that performance in motor control and executive skills such as inhibition and working memory are related in infants (Gottwald et al., 2016), and therefore, may rely on common processes early in life. Indeed, anticipating a stimulus regulates its processing, be it enhancement or suppression depending on the stimulus' relevance (Summerfield et al., 2008), and this process forms the basis of attention, the ability to select and filter relevant sensory inputs depending on context and goals.

2.2 | Prediction and EA

Attention commonly refers to a state in which we have a level of concentration that allows us optimal filtering of information from the environment (Conejero & Rueda, 2017). During the first months of life, the salience network (SN), consisting of the dorsal anterior cingulate cortex and anterior bilateral insulae (Ham et al., 2013) supports the development of exogenous attention, captured by salient stimuli in the environment, such as being touched. The SN partially overlaps with the alerting and orienting attention networks (Uddin, 2016), as they were described by Posner and Petersen (1990). Alerting and orienting attention develop first, then they serve as the foundation for endogenous attention, controlled by the subject and directed towards relevant but not salient stimuli. This latest form of attention is called EA. The successive development of attention networks (alerting, orienting, and EA networks) during the first years of life is associated with behavioral improvements in tasks involving EF such as inhibition of distractors (Holmboe et al., 2008) and tasks combining executive and motor control such as reaching for a hidden object (Diamond, 1990).

EA and EF are related constructs. EA is associated with the fields of attention and cognitive psychology and designates mechanisms that enable regulation between our perceptions and our actions (Rueda et al., 2021). EF is associated with the field of neuropsychology and refers to top-down control mechanisms involved in the modulation of our thoughts and actions when automatic processes are not sufficient. EA is a component of inhibitory control in Miyake's model of EF (Miyake & Friedman, 2012), but it is also a component of self-regulation (SR) in Diamond's model (Diamond, 2013). SR is an internal process that allows us to regulate our thoughts, emotions, and behaviors to overcome an internal conflict (Nigg, 2017). Although these models of adult cognition and neuropsychology consider EA as a part of EF or SR, from a developmental standpoint they should be conceived differently. The literature on young children shows that EF and SR are in fact overlapping constructs and that EA is a distinct and earlier process serving as the developmental foundation for the development of these two functions (Garon et al., 2008; Tiego et al., 2020). EA promotes EF and SR by allowing the child to control what sensory information is being processed. It enhances or dampens processing based on contextual or goal-related relevance (Kok et al., 2012), and predictions that were built through previous experience (Bubic et al., 2010). Johansson et al. (2015) confirmed that sustained attention at 1 year of age is predictive of EF and SR at 2 years.

In this section, we described why somatosensory prediction is a precursor of multisensory prediction, which allows exogenous forms of attention to emerge and scaffold the development of EA, which in turn serves as a developmental step toward SR and EF, fostering learning and higher order cognition. Individual differences in EA appear in early infancy and remain stable across childhood (Johansson et al., 2015), and children with greater EA efficiency have better understanding and performance in school, which promotes academic success and well-adjusted behaviors in the classroom (Blair & Razza, 2007). Therefore, it is important to understand individual differences in the earliest foundations of EA such as prediction, and this can be achieved in the youngest babies by using the somatosensory modality. In the following section, we review how the constructs discussed above are affected in NDD.

3 | SENSORY IMPAIRMENTS AND EA DEFICITS AT THE CORE OF NEURODEVELOPMENTAL DISORDERS

The prevalence of NDD in western countries is increasing (Elsabbagh et al., 2012; Zablotsky et al., 2017). Many factors—genetic, perinatal, and environmental—are involved in the etiology of NDD, and some tend to increase, such as environmental pollution or late pregnancies, which could play a role in this phenomenon. Among them, one possible explanation is that improvements in neonatal intensive care reduce mortality rates in prematurely born children

whereas preterm birth is a high-risk factor for atypical neurodevelopment, especially in very preterm infants (<32 weeks) (Ancel, 2009). Cohort follow-up studies such as Epipage-2 in France or Epicure in the UK report increased developmental deficits in a variety of domains: cognitive, motor alterations, and socio-emotional problems which are later expressed in heterogeneous patterns (Twilhaar et al., 2021). Sensory profiles and EF deficits in the preterm population, even without NDD diagnosis, are similar to those found in children diagnosed with NDD regardless of birth status, suggesting common pathological processes in these two populations for these particular domains (Bröring et al., 2017). In this section, we discuss the sensory and executive aspects of NDD symptomatology and how somatosensory processing impairments may be early precursors of attention and executive deficits in NDD trajectories.

3.1 | Somatosensory impairments in neurodevelopmental disorders

NDD symptomatology frequently involves atypical sensory processing or modulation, particularly in the tactile modality (Cascio, 2010). Tactile defensiveness, that is, hyperreactive or aversive reactions to innocuous tactile stimulations, is often reported in ASD, Tourette's syndrome, and ADHD.

In boys with ADHD, Parush et al. (2007) found that tactile defensiveness is associated with deficits in finger discrimination and larger somatosensory evoked potentials (SEP) on the electroencephalogram (EEG). The authors suggest it results from an impaired inhibition of the cortical processing of tactile inputs.

In children with ASD, Tomchek and Dunn (2007) used Dunn's Sensory Profile, a questionnaire designed to quantify sensory processing in different modalities in everyday situations (Dunn & Brown, 1997). Completed by a caregiver, it provides a basis for assessing the impact of sensory processing on the child's performance and quality of life. They found that 95% of children with ASD have sensory processing dysfunction, with greater differences in under-responsiveness or sensory-seeking behaviors, auditory filtering, and tactile sensitivity. Recently, Espenhahn et al. (2021) found that the N140 response, a component of SEP, had a lower amplitude and shorter latency in children with ASD. As for ADHD, the authors propose that an imbalance between excitation and inhibition in the brain underlies these observations. This is consistent with observations in mouse models of ASD: genetic alterations linked with ASD in some human patients cause alterations in mechanoreceptors, leading to impairments in inhibition of peripheral somatosensory neurons in mice (Orefice et al., 2016). This results in impaired tactile discrimination and sensitivity, provoking anxiety and aberrant social behaviors when mice grow up. In parallel, human studies of children and adolescents with ASD revealed overactivation of the neural SN, suggesting an overinvestment of attentional resources in favor of basic sensory processing (Green et al., 2016). Sensory overload would not allow for investment in social interactions with others and would favor more rigid routines. Hence, tactile processing impairment is not a correlate but a precursor of other autistic symptoms. It is interesting that this seems specific to NDD and not to all behavioral issues: Mammen et al. (2015) found that tactile avoidance in 9 months old infants was not predictive of emotion regulation deficits (neither internalizing nor externalizing symptoms) at 18 months, but was predictive of pervasive developmental disorders symptoms.

In the recent paper by Espenhahn et al. (2021), it was particularly interesting that differences in SEP correlated with parent-reported tactile reactivity in both ASD and typical children, supporting a dimensional approach to NDD and their somatosensory precursors. Even before the age of a possible diagnosis, abnormal sensory profiles are also more prevalent in children at high risk of NDD because of premature birth (Wickremasinghe et al., 2013). In addition to untimely stress on all physiological systems, first sensory experiences are modified due to the premature rupture with the intrauterine environment. Tactile stimulation is altered by the medical environment and care protocols (blood sampling or punctures for example) that impair sensory integration (Dumont et al., 2018). Chorna et al. (2014) showed that in children born before 30 weeks of gestational age, sensory reactivity was abnormal at the age of 24 months. Responses to tactile deep pressure and vestibular stimulation were most frequently affected, as confirmed by Crozier et al. (2015). Longitudinal studies of preterm neonates showed that sensory processing was predictive of later cognitive development and the onset of ASD symptoms from the age of 2 years (Vlaeminck et al., 2020). In very preterm neonates, lower tolerance of handling at birth was associated with tactile sensitivity and poorer EF at 4 years (Meether et al., 2021).

Sensory processing impairment, and particularly somatosensory, is a common feature of the symptomatology of children with NDD, mainly ASD and ADHD, and of children at high risk of NDD such as prematurely born infants. We now need to address the mechanisms mediating the relationship between somatosensory processing and NDD, taking into account the variety of syndromes. EEG studies in ADHD show increased SEP amplitude (Parush et al., 2007), whereas in ASD they found decreased amplitude and shorter latency (Espenhahn et al., 2021). The discrepancy may come from other aspects of the stimulation, such as varying attentional demands exerting opposite effects on

somatosensory processing depending on the disorder. In the previous section, we described how somatosensory prediction is the first building block of attention, the core mechanism of EF. Comparing SEP in ADHD and ASD patients for either expected or unexpected auditory stimuli, Gonzalez-Gadea et al. (2015) observed opposite frontal responses: ASD patients had increased frontal activity to expected stimuli and reduced activity to unexpected stimuli, whereas ADHD patients exhibited the opposite pattern. In other words, ASD patients dedicated more attention to predictable events, while ADHD patients favor unpredictable events. Both disorders build atypical attentional processes on atypical sensory processing but in different ways. This is consistent with differences in EF observed in these populations as they grow up.

3.2 | Executive and attention deficits in neurodevelopmental disorders

EF and attention impairments partially overlap across the various NDD (Otterman et al., 2019). Executive dysfunction has been demonstrated in ASD, mainly poor cognitive flexibility, for example using the Wisconsin Card Sorting Test and its version for preschool children, the Dimensional-Change Card-Sort task (Dichter et al., 2010), but also planning difficulties (Hill, 2004). Shifting and planning impairments explain the insistence on sameness that leads to highly distressing situations for children with ASD and their families. Authors proposed that attention deficits would be the underlying cause of EF deficits in ASD patients, but also the cause of their difficulties in processing social information in all sensory modalities. The Attention Network Test (ANT) is designed to assess the efficiency of Posner's attention networks and was adapted for children by Rueda et al. (2004). Using the ANT, Mutreja et al. (2016) found that children with ASD had specific impairment in orienting and EA, not alerting. Imaging studies showed that attention performance in ASD may be sustained by compensatory mechanisms in alternate brain networks (Vaidya et al., 2011), resulting in a coupling between orienting and EA in ASD patients (Keehn et al., 2010), whereas these networks are independent in typically developing children. As a consequence of the chronology of the development of attention networks, the orienting impairment in ASD causes a secondary impairment in EA, resulting in EF deficits. ADHD on the other hand is by definition an attention deficit, reflected in inhibition deficits, for example tested by Go/No-Go or stop signal tasks (Senderecka et al., 2012), and everyday difficulties in behavioral regulation and learning (Barkley, 1997). Using the ANT, Fabio and Urso (2014) described a specific EA impairment in children with ADHD compared with controls, but also compared with children with low attention without ADHD in routine screening questionnaires, confirming that EA deficit is a specific marker of NDD, not any developmental difficulty. It is important to note that attention deficits in ADHD also impair performance in task-switching (Rauch et al., 2012) and that 30% of children with ASD also present comorbid ADHD, cumulating flexibility and inhibition impairments (Craig et al., 2016). Children who have poorer EF when they start first core learnings in kindergarten are at greater risk for learning difficulties in elementary school (Morgan et al., 2019), compromising later academic success. LD are frequently comorbid with ADHD but can be expressed distinctly (Mayes et al., 2000). Consistent with the link between motor and executive development, resulting from their common foundations in somatosensory processing, children with developmental coordination disorders or other motor difficulties also have poorer performance on EF tasks (Leonard et al., 2015). The heterogeneity of symptoms among patients with the same disorder, the frequent co-morbidity of NDD in the same patient, and the overlap of symptoms among NDD, strongly suggest they have common organic etiological factors and physiopathological pathways (Taurines et al., 2012). These issues make early NDD detection and diagnosis a challenge when we consider each syndrome separately, but represent an opportunity if we assume a cross-syndromic approach and search for the early, sensory foundations of attention deficits. The neural mechanisms involved in atypical information processing in these populations are still poorly understood yet they could provide relevant information for developing appropriate therapeutic approaches.

Efforts to prevent NDD in high-risk populations, such as premature neonates, highlighted the high prevalence of dysexecutive syndromes and attention impairments in these children (Johnson & Marlow, 2011; van de Weijer-Bergsma et al., 2008). Even in the absence of a diagnosed NDD, children who were born preterm tend to perform lower on attentional and EF tasks such as problem-solving, cognitive flexibility, inhibitory control, or processing speed tasks (Hodel et al., 2017). Inhibitory control at 20 months predicts attentional abilities and school performance at 8 years of age and is particularly impaired in very premature babies (Jaekel et al., 2016). Studies using the ANT in children who were born preterm but were not diagnosed with NDD showed a significantly higher correlation between the orienting and executive networks (Pizzo et al., 2010), similar to what was reported in children diagnosed with ASD (Keehn et al., 2010).

Adams et al. (2015) found that in preschool children born prematurely, sensory symptoms measured using the short version of Dunn's Sensory Profile were associated with lower working memory and inhibition in a battery of EF tasks and a parental hetero-questionnaire, the Behavior Rating Inventory of Executive Functions—Preschool version (BRIEF-P).

Cognitive training programs at preschool age have shown positive effects in children without pathology (Rueda et al., 2012) and seem to alleviate the symptoms of children with ADHD (Vibholm et al., 2018). However, the long-term effects of these programs and their generalization to everyday situations are still controversial. For this reason, we need to better understand the early basis of atypical developmental trajectories, to target appropriate processes for remediation. Considering that NDD share common impairments in attention yielding overlapping executive symptoms, and that attention develops from sensory prediction processes of which somesthesia is the earliest foundation, can somatosensory processing be used as a marker of a patient's vulnerability to any NDD, and a target for early intervention?

4 | PERSPECTIVES FOR EARLY MARKERS AND SCREENING TOOLS

In Section 2, we described a developmental process leading from somatosensory prediction to multisensory prediction, to successive forms of attention of which the latest, EA, supports EF. In Section 3, we described common impairments in EF across NDD and in a population at high risk of NDD, prematurely born children, and the link between EF deficits and EA deficits in these populations. The chronology we presented explains why screening tools focusing on NDD symptoms are ineffective in very young children: clinical symptoms build upon other deficits that are not syndrome specific. In this section, we present efforts being made to provide better markers and early screening tools using a cross-syndromic approach, and we offer new perspectives on how to use tactile sensory processing as the earliest cognitive marker to detect a risk of NDD in vulnerable babies.

4.1 | Assessing early EF and EA

For many years, researchers have proposed tools to measure EF in preschoolers, such as a modified Stroop with animals instead of words (Wright et al., 2003), and many of them are now part of standard evaluation batteries in clinical practice. Through new tasks suitable for very young children and the contribution of neuroimaging techniques, we are getting a better understanding of EF and their underlying brain substrates from the end of the first year of life until the preschool period, even before children can give verbal responses (Fiske & Holmboe, 2019). Holmboe et al. (2008) developed the Freeze-Frame task, to assess inhibitory control during infancy and childhood. This visual inhibition task requires inhibiting peripheral visual distractors around a central animated stimulus. Performance on this task at 9 months predicts later success at 24 months of age. In continuity with this work, Holmboe et al. (2021) proposed a new task to measure inhibitory control during toddlerhood, the early childhood inhibitory touchscreen task (ECITT). In this task presented on a touchscreen, participants have to press the button presenting a happy face, a rewarded location. Sometimes, the happy face is presented in the other location and it requires toddlers to inhibit the prepotent location to give the correct response. Through accuracy and reaction times in the different conditions, this task provides information about inhibitory control development and can also be used from around 9 months of age. There is currently no data on how sensitive these new EF tasks are to NDD risk. Future studies should aim at comparing EF emergence in toddlerhood with other markers of risk and long-term outcome.

The use of computerized play tasks is also a promising way to better understand the early stages of EA development by combining behavioral and cerebral measures in very young children (Berger et al., 2000). The ANT, designed to assess the efficiency of the three attention networks in adults, was adapted for children to better understand the early development of EA in particular from the age of 6 years (Rueda et al., 2004). The participant must determine the direction of a central stimulus (left or right) presented between distractors ("flankers") by pressing buttons on a keyboard. This task involves inhibiting the flankers' information when it is incongruent with the target, but other parameters such as valid or invalid spatial cues also allow the assessment of alerting and orienting attention. Using the ANT, Rueda et al. (2012) showed EA improvement in 5-year-olds after several sessions of computerized attention training. Recently, a version of the ANT was proposed for even younger children, from 3 years of age (Casagrande et al., 2022). In this version, the target information is not the direction of the central animal but its color, flankers having opposite colors. It

will be interesting to see in the future how this new EA assessment applies to NDD screening and relates to other aspects of development, notably sensory processing.

4.2 | Tactile sensory processing as an early marker of EA deficit and NDD vulnerability

Developmental cognitive research has recently focused on the theoretical framework of predictive coding (see Box 1) to explain NDD symptomatology. Authors proposed for example that impaired prediction abilities may be at the core of ASD, explaining repetitive behaviors, planning deficits, and insistence on sameness (Palmer et al., 2017; Sinha et al., 2014; Van de Cruys et al., 2014). Children with ASD would have more difficulty adjusting to their environment and perceiving its regularities, and symptoms would reflect attempts to control or compensate for an unpredictable environment. Using a bimodal auditory–visual paradigm and functional brain imaging, Emberson et al. (2017) showed that 6-month-old infants who were born preterm showed a reduced occipital response to predicted visual stimuli, suggesting that prediction impairment may be an early marker of high risk of NDD. As mentioned in Section 3.1, Gonzalez-Gadea et al. (2015) observed opposed patterns of response enhancement in the brains of ASD and ADHD patients based on stimulus predictability. The nature of prediction deficits in NDD is debated (Van de Cruys et al., 2014) and beyond the scope of this article, but authors agree on the importance of sensory prediction for the development of attention, and the feedback role that attention plays in regulating sensory processing once the child transitions from externally directed attention toward endogenous, that is, executive, attention. In babies, when a stimulus is perceptually salient, it attracts attention regardless of relevance. As EA comes into play, when a task requires sustained attention to a stimulus, it is made salient by internal top-down processes and the response is enhanced, whereas when attention is not required the response is dampened (Kok et al., 2012). Early in life, sensory processing scaffolds the development of attention through predictive mechanisms, and later, attention in turn regulates sensory processing.

BOX 1 Predictive coding theory

The predictive coding theory is a theoretical framework of cognition based on the Bayesian theorem, aiming to explain how sensory inputs are processed and more generally how the brain works as inherently predictive (Friston, 2005). It postulates that the human brain constantly compares new sensory stimuli from primary cortices with internal models built by higher-order cortices from previous sensory inputs. If the input matches the prediction, it stabilizes the mental model of the stimulus by learning its characteristics, otherwise, a prediction error is fed back to update the probabilistic model. This theory provides a basis to understand sensory prediction and repetition suppression (the suppression of the cerebral response to a repeated, innocuous stimulus). Repetition suppression is the consequence of the internal stability of the model (Grill-Spector et al., 2006). Neural responses to stimuli can be enhanced or attenuated depending on their predictability and relevance to the subject's needs.

Since the earliest sensory modality is tactile, and because tactile processing is specifically affected in NDD and preterm neonates, the time has come to search for early somatosensory processing markers of neurodevelopment. Rational and positive tactile stimulation is increasingly considered in neonatal intensive care units as a tool that provides many benefits to vulnerable neonates: improved physiological constants, shorter hospital stays, faster weight gain, and more favorable overall motor and cognitive outcomes (Ardiel & Rankin, 2010; Field et al., 2004). For example, multiple “therapeutic touch” interventions are an essential component of the widespread Neonatal Individualized Developmental Care Assessment Program (Diego et al., 2009). These approaches do not specifically target one type of processing in particular, although they probably address the need for predictability implicitly: massage and caresses are naturally rhythmic interactions.

Recent studies focused more directly on the question of somatosensory prediction and regulation of somatosensory processing based on temporal parameters in premature neonates. Dumont et al. (2017) showed that neonates born more premature and with smaller birth weight, and therefore more at risk of NDD, had less efficient habituation to tactile stimuli at 35 weeks of corrected gestational age. In a follow-up study, they showed that somatosensory cortex activation is modulated according to the temporal regularity of the stimulation sequence as early as 33 weeks of gestational age (Dumont

et al., 2022). This suggests that atypical tactile sensory regulation could allow us to identify neonates at risk of an atypical developmental trajectory and perhaps deploy very early sensory intervention methods. We will need to examine the link between somatosensory prediction in premature neonates and outcome, in both diagnosed and not diagnosed children, following a dimensional approach of EA and EF measurement, and a cross-syndromic approach of NDD.

We are still lacking studies addressing the link between early somatosensory processing and attention, but Weiss et al. (2018) showed that brain anticipatory activity of school-aged children (6–8 years) during a somatosensory selective attention task correlated with their performance at EF evaluations. This is highly encouraging and needs further investigation, especially at preschool age when EA is rapidly developing. It will also be important to examine this relationship in children with various NDD, not only ASD and ADHD but also developmental coordination and LD for example. Providing a better understanding of the role of tactile sensory processing from the earliest age in relation to the development of EA, EF, motor control, and NDD diagnosis may make it possible to propose early screening and determine better intervention programs for all children.

5 | CONCLUSION

We reviewed knowledge on the place of somatosensory processing as the foundation of multisensory cognition, and its links with attention, EA in particular, and EF. We emphasized the developmental sequence that they form during typical child development, and detailed how neurodevelopmental disorders are associated with atypical or impaired performance at every step of this sequence, leading to clinical syndromes years later. We presented the emergence of new research on preschoolers' EF and EA assessment, and on the role of somatosensory processing, in particular prediction, as a precursor of attention. Finally, we proposed avenues of work to complete the picture with the links between somatosensory processing, early attention development, and cognitive outcome in both typically and atypically developing children. We propose that abnormal tactile sensory processing at an early age could provide markers of EA dysfunctions, which may promote new early screening programs for attention disorders and NDD. Research in these domains remains scarce and needs to be further explored, particularly in the preschool period, when EA is rapidly growing and is strongly required for core academic learning.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Marie Anquetil: Writing – original draft (lead). **Nadège Roche-Labarbe:** Writing – review and editing (equal). **Sandrine Rossi:** Writing – review and editing (equal).

FUNDING INFORMATION

This work was supported by a PhD grant to Marie Anquetil by the region Normandie council (France).

CONFLICT OF INTEREST

The authors have declared no conflicts of interest for this article.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

Data sharing is not applicable to this article as no new data were created or analyzed in this study.

ORCID

Marie Anquetil  <https://orcid.org/0000-0002-2136-4028>

Nadège Roche-Labarbe  <https://orcid.org/0000-0002-5010-0400>

Sandrine Rossi  <https://orcid.org/0000-0001-9285-2152>

RELATED WIREs ARTICLES

[Attention: The grounds of self-regulated cognition](#)

Watzl, S. (2022). What attention is. The priority structure account. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*. <https://doi.org/10.1002/wcs.1632>

FURTHER READING

Karr, J. E., Rodriguez, J. E., Goh, P. K., Martel, M. M., & Rast, P. (2022). The unity and diversity of executive functions: A network approach to life span development. *Developmental Psychology*, 58(4), 751–767. <https://doi.org/10.1037/dev0001313>

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>

REFERENCES

- Adams, J. N., Feldman, H. M., Huffman, L. C., & Loe, I. M. (2015). Sensory processing in preterm preschoolers and its association with executive function. *Early Human Development*, *91*(3), 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2015.01.013>
- Ancel, P.-Y. (2009). Le point sur la prématurité en 2009. *Revue de médecine périnatale*, *1*(3), 155–163. <https://doi.org/10.1007/s12611-009-0029-0>
- Ardiel, E. L., & Rankin, C. H. (2010). The importance of touch in development. *Paediatrics & Child Health*, *15*(3), 153–156. doi:10.1093/pch/15.3.153
- Arpino, C., Compagnone, E., Montanaro, M. L., Cacciatore, D., De Luca, A., Cerulli, A., Di Girolamo, S., & Curatolo, P. (2010). Preterm birth and neurodevelopmental outcome: A review. *Child's Nervous System*, *26*(9), 1139–1149. <https://doi.org/10.1007/s00381-010-1125-y>
- Assaiante, C., Barlaam, F., Cignetti, F., & Vaugoyeau, M. (2014). Body schema building during childhood and adolescence: A neurosensory approach. *Clinical Neurophysiology*, *44*(1), 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.125>
- Baek, S., Jaffe-Dax, S., & Emberson, L. L. (2020). How an infant's active response to structured experience supports perceptual-cognitive development. *Progress in Brain Research*, *254*, 167–186. doi:10.1016/bs.pbr.2020.05.015
- Barkley, R. A. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: Constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, *121*(1), 65–94. doi:10.1037/0033-2909.121.1.65
- Berger, A., Jones, L., Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2000). Computerized games to study the development of attention in childhood. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *32*(2), 297–303. doi:10.3758/BF03207798
- Bertenthal, B. I., & Longo, M. R. (2002). Advancing our understanding of early perceptual and cognitive development. *Human Development*, *45*(6), 434–440. <https://doi.org/10.2307/26763710>
- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development*, *78*(2), 647–663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>
- Bosch, R., Pagerols, M., Rivas, C., Sixto, L., Bricollé, L., Español-Martín, G., Prat, R., Ramos-Quiroga, J. A., & Casas, M. (2021). Neurodevelopmental disorders among Spanish school-age children: Prevalence and sociodemographic correlates. *Psychological Medicine*, *1–11*, 3062–3072. <https://doi.org/10.1017/S0033291720005115>
- Bremner, A. J., & Spence, C. (2017). Chapter seven—The development of tactile perception. In J. B. Benson (Ed.), *Advances in child development and behavior* (Vol. 52, pp. 227–268). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.acdb.2016.12.002>
- Bröring, T., Ostrom, K. J., Lafeber, H. N., Jansma, E. P., & Oosterlaan, J. (2017). Sensory modulation in preterm children: Theoretical perspective and systematic review. *PLoS One*, *12*(2), e0170828. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170828>
- Bubic, A., Von Cramon, D. Y., & Schubotz, R. I. (2010). Prediction, cognition and the brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*, 25. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00025>
- Casagrande, M., Marotta, A., Martella, D., Volpari, E., Agostini, F., Favieri, F., Forte, G., Rea, M., Ferri, R., Giordano, V., Doricchi, F., & Giovannoli, J. (2022). Assessing the three attentional networks in children from three to six years: A child-friendly version of the Attentional Network Test for Interaction. *Behavior Research Methods*, *54*(3), 1403–1415. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01668-5>
- Cascio, C. J. (2010). Somatosensory processing in neurodevelopmental disorders. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, *2*(2), 62–69. <https://doi.org/10.1007/s11689-010-9046-3>
- Cascio, C. J., Moore, D., & McGlone, F. (2019). Social touch and human development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *35*, 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.04.009>
- Chorna, O., Solomon, J. E., Slaughter, J. C., Stark, A. R., & Maitre, N. L. (2014). Abnormal sensory reactivity in preterm infants during the first year correlates with adverse neurodevelopmental outcomes at 2 years of age. *Archives of Disease in Childhood. Fetal and Neonatal Edition*, *99*(6), 475–479. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2014-306486>
- Conejero, Á., & Rueda, M. R. (2017). Early development of executive attention. *Journal of Child and Adolescent Behavior*, *5*(2), 341. <https://doi.org/10.4172/2375-4494.1000341>
- Craig, F., Margari, F., Legrottaglie, A. R., Palumbi, R., de Giambattista, C., & Margari, L. (2016). A review of executive function deficits in autism spectrum disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, *12*, 1191–1202. <https://doi.org/10.2147/NDT.S104620>
- Crozier, S. C., Goodson, J. Z., Mackay, M. L., Synnes, A. R., Grunau, R. E., Miller, S. P., & Zwicker, J. G. (2015). Sensory processing patterns in children born very preterm. *The American Journal of Occupational Therapy*, *70*(1), 7001220050p1–7. <https://doi.org/10.5014/ajot.2016.018747>
- De Felice, A., Ricceri, L., Venerosi, A., Chiarotti, F., & Calamandrei, G. (2015). Multifactorial origin of neurodevelopmental disorders: Approaches to understanding complex etiologies. *Toxics*, *3*(1), 89–129. <https://doi.org/10.3390/toxics3010089>
- Diamond, A. (1990). Developmental time course in human infants and infant monkeys, and the neural bases of, inhibitory control in reaching. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *608*(1), 637–676. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1990.tb48913.x>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, *64*(1), 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>

- Dichter, G. S., Radonovich, K. J., Turner-Brown, L. M., Lam, K. S. L., Holtzclaw, T. N., & Bodfish, J. W. (2010). Performance of children with autism Spectrum disorders on the dimension-change card Sort task. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 40(4), 448–456. <https://doi.org/10.1007/s10803-009-0886-1>
- Diego, M. A., Field, T., & Hernandez-Reif, M. (2009). Procedural pain heart rate responses in massaged preterm infants. *Infant Behavior & Development*, 32(2), 226–229. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2008.12.001>
- Dumont, V., Bulla, J., Bessot, N., Gonidec, J., Zabalia, M., Guillois, B., & Roche-Labarbe, N. (2017). The manual orienting response habituation to repeated tactile stimuli in preterm neonates: Discrimination of stimulus locations and interstimulus intervals. *Developmental Psychobiology*, 59(5), 590–602. <https://doi.org/10.1002/dev.21526>
- Dumont, V., Delaunay-El Allam, M., & Roche-Labarbe, N. (2018). Psychobiological foundations of early sensory-motor development and implications for neonatal care. In *The Routledge international handbook of psychobiology* (pp. 481–503). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315642765-33>
- Dumont, V., Giovannella, M., Zuba, D., Clouard, R., Durduran, T., Guillois, B., & Roche-Labarbe, N. (2022). Somatosensory prediction in the premature neonate brain. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 57, 101148. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101148>
- Dunn, W., & Brown, C. (1997). Factor analysis on the sensory profile from a national sample of children without disabilities. *American Journal of Occupational Therapy*, 51(7), 490–495. <https://doi.org/10.5014/ajot.51.7.490>
- Elsabbagh, M., Divan, G., Koh, Y.-J., Kim, Y. S., Kauchali, S., Marcín, C., Montiel-Nava, C., Patel, V., Paula, C. S., Wang, C., Yasamy, M. T., & Fombonne, E. (2012). Global prevalence of autism and other pervasive developmental disorders. *Autism Research*, 5(3), 160–179. <https://doi.org/10.1002/aur.239>
- Emberson, L. L., Boldin, A. M., Riccio, J. E., Guillet, R., & Aslin, R. N. (2017). Deficits in top-down sensory prediction in infants at risk due to premature birth. *Current Biology*, 27(3), 431–436. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.12.028>
- Emberson, L. L., Boldin, A. M., Robertson, C. E., Cannon, G., & Aslin, R. N. (2019). Expectation affects neural repetition suppression in infancy. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 37, 100597. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.11.001>
- Espenhahn, S., Godfrey, K. J., Kaur, S., Ross, M., Nath, N., Dmitrieva, O., McMorris, C., Cortese, F., Wright, C., Murias, K., Dewey, D., Protzner, A. B., McCrimmon, A., Bray, S., & Harris, A. D. (2021). Tactile cortical responses and association with tactile reactivity in young children on the autism spectrum. *Molecular Autism*, 12(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s13229-021-00435-9>
- Fabio, R. A., & Urso, M. (2014). The analysis of Attention Network in ADHD, attention problems and typically developing subjects. *Life Span and Disability*, 17(2), 199–221.
- Fearon, I., Hains, S. M. J., Muir, D. W., & Kisilevsky, B. S. (2002). Development of tactile responses in human preterm and full-term infants from 30 to 40 weeks postconceptional age. *Infancy*, 3(1), 31–51. <https://doi.org/10.1207/15250000252828235>
- Field, T., Hernandez-Reif, M., Diego, M., Feijo, L., Vera, Y., & Gil, K. (2004). Massage therapy by parents improves early growth and development. *Infant Behavior and Development*, 27(4), 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2004.03.004>
- Fiske, A., & Holmboe, K. (2019). Neural substrates of early executive function development. *Developmental Review*, 52, 42–62. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2019.100866>
- Francés, L., Quintero, J., Fernández, A., Ruiz, A., Caules, J., Fillon, G., Hervás, A., & Soler, C. V. (2022). Current state of knowledge on the prevalence of neurodevelopmental disorders in childhood according to the DSM-5: A systematic review in accordance with the PRISMA criteria. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, 16(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s13034-022-00462-1>
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815–836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31–60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Gonzalez-Gadea, M. L., Chennu, S., Bekinschtein, T. A., Rattazzi, A., Beraudi, A., Tripicchio, P., Moyano, B., Soffita, Y., Steinberg, L., Adolphi, F., Sigman, M., Marino, J., Manes, F., & Ibanez, A. (2015). Predictive coding in autism spectrum disorder and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Neurophysiology*, 114(5), 2625–2636. <https://doi.org/10.1152/jn.00543.2015>
- Gottwald, J. M., Achermann, S., Marciszko, C., Lindskog, M., & Gredebäck, G. (2016). An embodied account of early executive-function development: Prospective motor control in infancy is related to inhibition and working memory. *Psychological Science*, 27(12), 1600–1610. <https://doi.org/10.1177/0956797616667447>
- Green, S. A., Hernandez, L., Bookheimer, S. Y., & Dapretto, M. (2016). Salience network connectivity in autism is related to brain and behavioral markers of sensory overresponsivity. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 55(7), 618–626.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2016.04.013>
- Grill-Spector, K., Henson, R., & Martin, A. (2006). Repetition and the brain: Neural models of stimulus-specific effects. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(1), 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.11.006>
- Ham, T., Leff, A., de Boissezon, X., Joffe, A., & Sharp, D. J. (2013). Cognitive control and the salience network: An investigation of error processing and effective connectivity. *Journal of Neuroscience*, 33(16), 7091–7098.
- Hertenstein, M. J., Verkamp, J. M., Kerestes, A. M., & Holmes, R. M. (2006). The communicative functions of touch in humans, nonhuman primates, and rats: A review and synthesis of the empirical research. *Genetic, Social, and General Psychology Monographs*, 132(1), 5–94. <https://doi.org/10.3200/MONO.132.1.5-94>
- Hill, E. L. (2004). Executive dysfunction in autism. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(1), 26–32.
- Hodel, A. S., Senich, K. L., Jokinen, C., Sasson, O., Morris, A. R., & Thomas, K. M. (2017). Early executive function differences in infants born moderate-to-late preterm. *Early Human Development*, 113, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2017.07.007>

- Holmboe, K., Larkman, C., de Klerk, C., Simpson, A., Bell, M. A., Patton, L., Christodoulou, C., & Dvergsdal, H. (2021). The early childhood inhibitory touchscreen task: A new measure of response inhibition in toddlerhood and across the lifespan. *PLoS One*, *16*(12), e0260695. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260695>
- Holmboe, K., Pasco Fearon, R. M., Csibra, G., Tucker, L. A., & Johnson, M. H. (2008). Freeze-Frame: A new infant inhibition task and its relation to frontal cortex tasks during infancy and early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, *100*(2), 89–114. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.09.004>
- Jaekel, J., Eryigit-Madzwamuse, S., & Wolke, D. (2016). Preterm toddlers' inhibitory control abilities predict attention regulation and academic achievement at age 8 years. *The Journal of Pediatrics*, *169*, 87–92.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2015.10.029>
- Jeste, S. S. (2015). Neurodevelopmental behavioral and cognitive disorders. *Continuum: Lifelong Learning in Neurology*, *21*, 690–714. <https://doi.org/10.1212/01.CON.0000466661.89908.3c>
- Johansson, M., Marciszko, C., Gredebäck, G., Nyström, P., & Bohlin, G. (2015). Sustained attention in infancy as a longitudinal predictor of self-regulatory functions. *Infant Behavior & Development*, *41*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2015.07.001>
- Johnson, S., & Marlow, N. (2011). Preterm birth and childhood psychiatric disorders. *Pediatric Research*, *69*(5 Part 2), 11R–18R. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e318212f2aa0>
- Karmiloff-Smith, A. (2009). Preaching to the converted? From constructivism to neuroconstructivism. *Child Development Perspectives*, *3*(2), 99–102. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2009.00086.x>
- Keehn, B., Lincoln, A. J., Müller, R.-A., & Townsend, J. (2010). Attentional networks in children and adolescents with autism spectrum disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *51*(11), 1251–1259. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02257.x>
- Kok, P., Rahnev, D., Jehee, J. F. M., Lau, H. C., & de Lange, F. P. (2012). Attention reverses the effect of prediction in silencing sensory signals. *Cerebral Cortex*, *22*(9), 2197–2206. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr310>
- Kouider, S., Long, B., Le Stanc, L., Charron, S., Fievet, A.-C., Barbosa, L. S., & Gelskov, S. V. (2015). Neural dynamics of prediction and surprise in infants. *Nature Communications*, *6*(1), 8537. <https://doi.org/10.1038/ncomms9557>
- Leonard, H. C., Bernardi, M., Hill, E. L., & Henry, L. A. (2015). Executive functioning, motor difficulties, and developmental coordination disorder. *Developmental Neuropsychology*, *40*(4), 201–215. <https://doi.org/10.1080/87565641.2014.997933>
- Lickliter, R. (2011). The integrated development of sensory organization. *Clinics in Perinatology*, *38*(4), 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.clp.2011.08.007>
- Mammen, M. A., Moore, G. A., Scaramella, L. V., Reiss, D., Ganiban, J. M., Shaw, D. S., Leve, L. D., & Neiderhiser, J. M. (2015). Infant avoidance during a tactile task predicts autism spectrum behaviors in toddlerhood. *Infant Mental Health Journal*, *36*(6), 575–587. <https://doi.org/10.1002/imhj.21539>
- Martens, G. J. M., & van Loo, K. M. J. (2007). Genetic and environmental factors in complex neurodevelopmental disorders. *Current Genomics*, *8*(7), 429–444. <https://doi.org/10.2174/138920207783591717>
- Mayes, S. D., Calhoun, S. L., & Crowell, E. W. (2000). Learning disabilities and ADHD: Overlapping spectrum disorders. *Journal of Learning Disabilities*, *33*(5), 417–424. <https://doi.org/10.1177/002221940003300502>
- Meether, M., Bush, C. N., Richter, M., & Pineda, R. (2021). Neurobehaviour of very preterm infants at term equivalent age is related to early childhood outcomes. *Acta Paediatrica*, *110*(4), 1181–1188. <https://doi.org/10.1111/apa.15595>
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(1), 8–14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Morgan, P. L., Farkas, G., Wang, Y., Hillemeier, M. M., Oh, Y., & Maczuga, S. (2019). Executive function deficits in kindergarten predict repeated academic difficulties across elementary school. *Early Childhood Research Quarterly*, *46*, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.06.009>
- Mutreja, R., Craig, C., & O'Boyle, M. W. (2016). Attentional network deficits in children with autism spectrum disorder. *Developmental Neuropsychology*, *19*(6), 389–397. <https://doi.org/10.3109/17518423.2015.1017663>
- Nigg, J. T. (2017). Annual Research Review: On the relations among self-regulation, self-control, executive functioning, effortful control, cognitive control, impulsivity, risk-taking, and inhibition for developmental psychopathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *58*(4), 361–383. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12675>
- Orefice, L. L., Zimmerman, A. L., Chirila, A. M., Sleboda, S. J., Head, J. P., & Ginty, D. D. (2016). Peripheral mechanosensory neuron dysfunction underlies tactile and behavioral deficits in mouse models of ASDs. *Cell*, *166*(2), 299–313. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.05.033>
- Otterman, D. L., Koopman-Verhoeff, M. E., White, T. J., Tiemeier, H., Bolhuis, K., & Jansen, P. W. (2019). Executive functioning and neurodevelopmental disorders in early childhood: A prospective population-based study. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, *13*, 38. <https://doi.org/10.1186/s13034-019-0299-7>
- Ozonoff, S. (2015). Editorial: Early detection of mental health and neurodevelopmental disorders: The ethical challenges of a field in its infancy. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *56*(9), 933–935. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12452>
- Ozonoff, S., & Jensen, J. (1999). Brief report: Specific executive function profiles in three neurodevelopmental disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *29*(2), 171–177. <https://doi.org/10.1023/A:1023052913110>
- Palmer, C. J., Lawson, R. P., & Hohwy, J. (2017). Bayesian approaches to autism: Towards volatility, action, and behavior. *Psychological Bulletin*, *143*(5), 521–542. <https://doi.org/10.1037/bul0000097>
- Parush, S., Sohmer, H., Steinberg, A., & Kaitz, M. (2007). Somatosensory function in boys with ADHD and tactile defensiveness. *Physiology & Behavior*, *90*(4), 553–558. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.11.004>
- Pizzo, R., Urben, S., Linden, M. V. D., Borradori-Tolsa, C., Freschi, M., Forcada-Guex, M., Hüppi, P., & Barisnikov, K. (2010). Attentional networks efficiency in preterm children. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *16*(1), 130–137. <https://doi.org/10.1017/S1355617709991032>

- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13(1), 25–42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Rauch, W. A., Gold, A., & Schmitt, K. (2012). To what extent are task-switching deficits in children with attention-deficit/hyperactivity disorder independent of impaired inhibition? *Attention Deficit and Hyperactivity Disorders*, 4(4), 179–187. <https://doi.org/10.1007/s12402-012-0083-5>
- Reddy, V., Markova, G., & Wallot, S. (2013). Anticipatory adjustments to being picked up in infancy. *PLoS One*, 8(6), e65289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065289b>
- Rohr, C. S., Arora, A., Cho, I. Y. K., Katlariwala, P., Dimond, D., Dewey, D., & Bray, S. (2018). Functional network integration and attention skills in young children. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.03.007>
- Rueda, M. R., Checa, P., & Cómbita, L. M. (2012). Enhanced efficiency of the executive attention network after training in preschool children: Immediate changes and effects after two months. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, S192–S204. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.004>
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P., & Posner, M. I. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, 42(8), 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Rueda, M. R., Moyano, S., & Rico-Picó, J. (2021). Attention: The grounds of self-regulated cognition. *WIREs. Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, e1582. <https://doi.org/10.1002/wcs.1582>
- Schubotz, R. I. (2015). Prediction and expectation. In *Brain mapping* (pp. 295–302). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397025-1.00247-5>
- Senderecka, M., Grabowska, A., Szewczyk, J., Gerc, K., & Chmylak, R. (2012). Response inhibition of children with ADHD in the stop-signal task: An event-related potential study. *International Journal of Psychophysiology*, 85(1), 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.05.007>
- Serino, A., & Haggard, P. (2010). Touch and the body. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2), 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.004>
- Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., Diamond, S. P., & Held, R. M. (2014). Autism as a disorder of prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(42), 15220–15225. <https://doi.org/10.1073/pnas.1416797111>
- Summerfield, C., Trittschuh, E. H., Monti, J. M., Mesulam, M. M., & Egner, T. (2008). Neural repetition suppression reflects fulfilled perceptual expectations. *Nature Neuroscience*, 11(9), 1004–1006. <https://doi.org/10.1038/nn.2163>
- Taurines, R., Schwenck, C., Westerwald, E., Sachse, M., Siniatchkin, M., & Freitag, C. (2012). ADHD and autism: Differential diagnosis or overlapping traits? A selective review. *Attention Deficit and Hyperactivity Disorders*, 4(3), 115–139. <https://doi.org/10.1007/s12402-012-0086-2>
- Tiego, J., Bellgrove, M. A., Whittle, S., Pantelis, C., & Testa, R. (2020). Common mechanisms of executive attention underlie executive function and effortful control in children. *Developmental Science*, 23(3), e12918. <https://doi.org/10.1111/desc.12918>
- Tomchek, S. D., & Dunn, W. (2007). Sensory processing in children with and without autism: A comparative study using the short sensory profile. *The American Journal of Occupational Therapy*, 61(2), 190–200. <https://doi.org/10.5014/ajot.61.2.190>
- Twilhaar, E. S., Pierrat, V., Marchand-Martin, L., Benhammou, V., Kaminski, M., & Ancel, P.-Y. (2021). Profiles of functioning in 5.5-year-old very preterm born children in France: The EPIPAGE-2 study. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 61, 881–891. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2021.09.001>
- Uddin, L. Q. (2016). *Saliency network of the human brain*. Academic Press.
- Vaidya, C. J., Foss-Feig, J., Shook, D., Kaplan, L., Kenworthy, L., & Gaillard, W. D. (2011). Controlling attention to gaze and arrows in childhood: An fMRI study of typical development and autism spectrum disorders. *Developmental Science*, 14(4), 911–924. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01041.x>
- Van de Cruys, S., Evers, K., Van der Hallen, R., Van Eyllen, L., Boets, B., de Wit, L., & Wagemans, J. (2014). Precise minds in uncertain worlds: Predictive coding in autism. *Psychological Review*, 121(4), 649–675. <https://doi.org/10.1037/a0037665>
- van de Weijer-Bergsma, E., Wijnroks, L., & Jongmans, M. J. (2008). Attention development in infants and preschool children born preterm: A review. *Infant Behavior and Development*, 31(3), 333–351. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2007.12.003>
- van Ede, F., de Lange, F. P., & Maris, E. (2014). Anticipation increases tactile stimulus processing in the ipsilateral primary somatosensory cortex. *Cerebral Cortex*, 24(10), 2562–2571. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht111>
- Vibholm, H. A., Pedersen, J., Faltinsen, E., Marcussen, M. H., Gluud, C., & Storebø, O. J. (2018). Training, executive, attention and motor skills (TEAMS) training versus standard treatment for preschool children with attention deficit hyperactivity disorder: A randomised clinical trial. *BMC Research Notes*, 11, 366. <https://doi.org/10.1186/s13104-018-3478-3>
- Vlaeminck, F., Vermeirsch, J., Verhaeghe, L., Warreyn, P., & Roeyers, H. (2020). Predicting cognitive development and early symptoms of autism spectrum disorder in preterm children: The value of temperament and sensory processing. *Infant Behavior and Development*, 59, 101442. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2020.101442>
- Weiss, S. J., Wilson, P., Hertenstein, M. J., & Campos, R. (2000). The tactile context of a mother's caregiving: Implications for attachment of low birth weight infants. *Infant Behavior and Development*, 23(1), 91–111. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(00\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(00)00030-8)
- Weiss, S. M., Meltzoff, A. N., & Marshall, P. J. (2018). Neural measures of anticipatory bodily attention in children: Relations with executive function. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 34, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.08.002>
- Wickremasinghe, A. C., Rogers, E. E., Johnson, B. C., Shen, A., Barkovich, A. J., & Marco, E. J. (2013). Children born prematurely have atypical sensory profiles. *Journal of Perinatology*, 33(8), 631–635. <https://doi.org/10.1038/jp.2013.12>

- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H., & Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development: Typical developmental trends. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(4), 561–575. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00145>
- Zablotsky, B., Black, L. I., & Blumberg, S. J. (2017). Estimated prevalence of children with diagnosed developmental disabilities in the United States, 2014–2016. *National Center for Health Statistics Data Brief*, 291, 1–8.

How to cite this article: Anquetil, M., Roche-Labarbe, N., & Rossi, S. (2022). Tactile sensory processing as a precursor of executive attention: Toward early detection of attention impairments and neurodevelopmental disorders. *WIREs Cognitive Science*, e1640. <https://doi.org/10.1002/wcs.1640>

Qui sommes-nous?



Marie Anquetil
Psychologue de l'enfant



Sandrine Rossi
Professeur des Universités
Psychologue de l'éducation



Nadège Roche-Labarbe
Maître de conférences
Psychologue de l'enfant



Victoria Dumont
Docteur en psychologie
Psychologue de l'enfant



Anne-Lise Marais
Psychologue de l'éducation

Ensemble, faisons progresser la recherche !



MEDiATE-PRV est un projet du
programme DECODE.

Pour en savoir plus sur nos
recherches :

decode.unicaen.fr

Fais attention ... Concentre-toi... Projet MEDiATE-PRV



Votre enfant est **né prématuré**
ou bénéficie d'un **suivi**
psycho-éducatif ?

Il a entre **4 ans et 5 ans 11 mois** ?

Vous pouvez aider la recherche à
mieux comprendre comment se
développent les capacités
attentionnelles de votre enfant.



Que va faire mon enfant?

Pendant environ 1 heure, nous proposerons à votre enfant un jeu sur ordinateur sollicitant l'attention et des jeux sollicitant la motricité et le contrôle des mouvements.



Vous serez également invité à remplir des questionnaires concernant les comportements de votre enfant et sa sensibilité sensorielle.



Pourquoi participer à l'étude ?

La participation de votre enfant aide la recherche à améliorer les connaissances sur le développement des capacités attentionnelles et son lien avec le sens du toucher, chez des enfants de maternelle ayant des profils variés (naissance prématurée ou prise en charge psycho-éducative).

La participation à l'étude ne comporte aucun risque pour votre enfant.

Elle est anonyme et aucune information personnelle ne sera recueillie. Ce projet n'évalue pas les performances individuelles de votre enfant.

Où se déroule l'étude ?

L'étude se déroule au laboratoire COMETE du Pôle de Formation et de Recherche en Santé, 2 rue des Rochambelles à CAEN.

Vous êtes intéressé pour que votre enfant participe à l'étude ?

Contactez-nous !

mediate@unicaen.fr



Nous vous transmettrons ensuite les documents d'information et de consentement pour que votre enfant puisse participer.

Merci !



L'équipe de recherche



Marie Anquetil
Psychologue de l'enfant



Sandrine Rossi
Professeur des Universités
Psychologue de l'éducation



Nadège Roche-Labarbe
Maître de conférences-HDR
Psychologue de l'enfant



Victoria Dumont
Docteur en psychologie
Psychologue de l'enfant



Anne-Lise Marais
Psychologue de l'éducation

MEDiATE est un projet du
programme DECODE :

decode.unicaen.fr

Ensemble, faisons
progresser la
recherche !



PROJET MEDiATE

Votre enfant a entre 4 et 5 ans?



Vous pouvez aider la recherche à
mieux comprendre comment se
développent les capacités
attentionnelles de votre enfant.

Que va faire mon enfant?

Pendant une demi-journée, nous proposerons à votre enfant des jeux sollicitant la **motricité et le contrôle des mouvements**.

Nous proposerons également un **jeu sur ordinateur** sollicitant son attention et un **test de perception tactile**. Votre enfant, allongé sur un transat, recevra de légères vibrations sur son avant-bras (vibrations équivalentes à celles d'un téléphone).

Ces deux mesures nécessitent la pose d'un filet type "méduse" enregistrant l'activité cérébrale.

L'électroencéphalographie (EEG) est une technique de mesure cérébrale non invasive et indolore.

Vous serez également invité à remplir des **questionnaires** concernant les comportements de votre enfant et sa sensibilité sensorielle.



Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre le **développement de l'attention chez les enfants de 48 à 60 mois et son lien avec le sens du toucher**.

Pourquoi participer?

La participation de votre enfant aide la recherche à améliorer les connaissances sur le développement des capacités attentionnelles et son lien avec le sens du toucher, chez des enfants de maternelle. La participation à l'étude ne comporte aucun risque pour votre enfant. Elle est anonyme et aucune information personnelle ne sera recueillie. Ce projet n'évalue pas les performances individuelles de votre enfant.

Comment participer?

L'étude se déroule au laboratoire COMETE du Pôle de Formation et de Recherche en Santé, 2 rue des Rochambelles à CAEN.

Contactez-nous :

mediate@unicaen.fr

Nous vous transmettrons les documents d'information et de consentement pour que votre enfant puisse participer.

Merci !



Identité de l'enfant :

Date de naissance de l'enfant (sinon : âge en années, mois)

Sexe de l'enfant :

Votre identité :

Relation à l'enfant (mère, père, enseignant, éducateur, assistant maternel, assistant familial, autre/préciser) :

Date de réponse au questionnaire :



















1 Vous connaissez l'enfant : Peu Assez bien Très bien

L'ENFANT (cochez une seule réponse) :

| | Jamais | Parfois | Souvent |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2 A des réactions excessives face à des problèmes mineurs. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 Quand deux choses sont à faire, il/elle ne se souvient que de la dernière ou que de la première. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4 N'a pas conscience de la manière dont son comportement affecte ou dérange les autres. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5 Quand on lui demande de ranger les choses, il/elle le fait de manière désorganisée et au hasard. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6 Est contrarié(e) par les situations nouvelles. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 A des accès de colère explosifs. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8 A des problèmes pour poursuivre les actions afin de terminer ses tâches (comme essayer de mettre les pièces d'un puzzle une par une, ranger pour gagner une récompense). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9 Continue à rire de choses ou de situations drôles, alors que les autres s'arrêtent. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10 A besoin qu'on lui dise comment commencer une tâche, même lorsqu'il/elle est d'accord pour le faire. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 11 A des difficultés pour s'adapter aux nouvelles personnes (telles que la baby-sitter, l'enseignant, les amis ou l'assistante maternelle). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 12 S'irrite trop facilement. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 13 A des difficultés pour se concentrer sur les jeux, les puzzles ou les activités ludiques. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 14 Doit être surveillé(e) de plus près que ses camarades. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 15 Lorsqu'on lui demande d'aller chercher quelque chose, oublie ce qu'il/elle est supposé(e) aller chercher. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 16 Le changement de projet ou d'habitude le/la perturbe beaucoup (par exemple, ordre des activités quotidiennes, ajout de courses à planifier à la dernière minute, changement de trajet pour aller au magasin). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 17 A des accès de colère pour des raisons anodines. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 18 Répète les mêmes erreurs, encore et encore, même après qu'on l'ait aidé(e). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 19 Agit de manière plus brutale ou plus infantile que les autres membres du groupe (par exemple, fêtes d'anniversaire, jeux en groupe). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 20 Ne trouve pas ses vêtements, ses chaussures, ses jouets ou ses livres, même lorsqu'on lui donne des conseils ou des explications. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 21 A besoin de beaucoup de temps avant de se sentir à l'aise dans de nouveaux endroits ou de nouvelles situations (comme rendre visite à des membres éloignés de la famille ou à de nouveaux amis). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 22 Son humeur change souvent. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 23 Commet des erreurs "bêtes" sur des choses qu'il/elle est capable de faire. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 24 Est agité(e), remuant(e), ou se tortille. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 25 A des difficultés pour suivre les habitudes établies pour dormir, manger ou jouer. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 26 Est perturbé(e) par des bruits forts, des lumières vives ou par certaines odeurs. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 27 De petits événements déclenchent des réactions démesurées. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 28 Peine pour faire ses tâches quotidiennes ou des activités qui nécessitent plus d'une étape. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Annexe 3 – Questionnaire BRIEF-P

| | Jamais | Parfois | Souvent |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 29 Est impulsif(ve). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 30 A des difficultés à envisager une approche différente pour résoudre un problème ou terminer une activité quand il/elle est bloqué(e). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 31 Est perturbé(e) par des changements dans l'environnement (par exemple, de nouveaux meubles, des choses déplacées dans une pièce ou de nouveaux | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 32 Les accès de colère ou de pleurs sont intenses mais se terminent brusquement. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 33 N'arrive pas à se maintenir sur une activité sans l'aide d'un adulte. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 34 Ne s'aperçoit pas quand son comportement provoque des réactions négatives. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 35 Laisse aux autres le soin de ranger ce que lui/elle-même a mis en désordre, malgré des demandes. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 36 A des difficultés pour changer d'activité. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 37 Réagit de manière plus violente que les autres enfants. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 38 Oublie ce qu'il/elle est en train de faire au milieu d'une activité. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 39 Ne comprend pas que, parfois, il/elle peut déranger les autres. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 40 Se focalise sur des petits détails d'une tâche ou d'une situation et perd de vue l'idée principale. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 41 A des difficultés à prendre part à des événements sociaux inhabituels (comme les fêtes d'anniversaire, les piques-niques et les réunions de famille). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 42 Est facilement abattu(e) ou surexcité(e) par des activités journalières classiques. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 43 A du mal à finir ce qu'il/elle commence (comme les jeux, les puzzles, les activités basées sur l'imagination). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 44 Perd le contrôle de lui/elle-même davantage que ses camarades. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 45 Ne trouve ses affaires, ni dans sa chambre, ni dans l'aire de jeux, même lorsqu'on lui donne des consignes claires. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 46 S'oppose au changement de routines, d'alimentation, de lieu, etc. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 47 Reste longtemps déçu(e) après avoir eu un problème. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 48 A du mal à poursuivre sur un seul sujet lorsqu'il/elle parle. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 49 Parle ou joue trop bruyamment. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 50 Ne termine pas ses activités même après que la marche à suivre lui ait été indiquée. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 51 Se sent débordé(e) ou dépassé(e) dans les situations où il y a beaucoup de monde et d'agitation (beaucoup de bruits, d'activité, de personnes). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 52 A des difficultés pour commencer des activités ou des tâches, même après des explications ou des conseils. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 53 Agit de manière trop brutale ou a du mal à contrôler ses réactions. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 54 Ne fournit pas les efforts à la hauteur de ses capacités dans les activités. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 55 A du mal à s'arrêter même après qu'on le lui ait demandé. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 56 Est incapable de décrire jusqu'au bout un événement, une personne ou une histoire. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 57 Termine trop vite ses tâches ou ses activités. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 58 N'a pas conscience s'il/elle réussit ou non. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 59 Est facilement distrait(e) pendant les activités. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 60 A des difficultés à se souvenir de quelque chose, même après un temps bref. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 61 A tendance à faire le fou. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 62 A une capacité d'attention réduite. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 63 Joue de manière insouciant(e) ou imprudent(e) dans des situations où il/elle pourrait se faire mal (par exemple, dans les terrains de jeu, à la piscine). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 64 N'a pas conscience quand il/elle réussit ou échoue une tâche. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

| | | | | | | | | TOUJOURS | FREQUEMMENT | PARFOIS | PEU | JAMAIS | |
|---|---|--|---|--|--|--|--|----------|-------------|---------|-----|--------|--|
| Item | | D. Traitement de l'information tactile | | | | | | | | | | | |
|  | B | 29 | Evite de se salir (par exemple, avec de la pâte, du sable, de la peinture, de la colle). | | | | | | | | | | |
|  | B | 30 | Exprime de l'anxiété au moment de la toilette ou des soins (par exemple, se débat ou pleure quand on lui coupe les cheveux ou les ongles, quand on lui lave le visage). | | | | | | | | | | |
|  | B | 31 | Préfère porter des vêtements à manches longues quand il fait chaud ou à manches courtes quand il fait froid. | | | | | | | | | | |
|  | B | 32 | Manifeste de l'inconfort quand on intervient sur ses dents ou lors du brossage des dents (par exemple, pleure ou se débat). | | | | | | | | | | |
|  | B | 33 | Est sensible à certains tissus (par exemple, vêtements, draps). | | | | | | | | | | |
|  | B | 34 | Est irrité/agacé par les chaussures ou les chaussettes. | | | | | | | | | | |
|  | B | 35 | Evite de marcher pieds nus, surtout dans le sable ou dans l'herbe. | | | | | | | | | | |
|  | B | 36 | Réagit avec émotion ou de manière agressive lorsqu'on le touche. | | | | | | | | | | |
|  | B | 37 | Evite les éclaboussures d'eau. | | | | | | | | | | |
|  | B | 38 | A des difficultés à rester dans une file d'attente ou près des autres. | | | | | | | | | | |
|  | B | 39 | Se frotte ou se gratte à l'endroit où il vient d'être touché. | | | | | | | | | | |
|  | E | 40 | Touche les gens et les objets au point d'irriter les autres. | | | | | | | | | | |
|  | E | 41 | Manifeste un besoin inhabituel de toucher certains jouets, certaines surfaces ou textures (par exemple, touche constamment des objets). | | | | | | | | | | |
|  | E | 42 | A peu conscience de la douleur et de la température. | | | | | | | | | | |
|  | E | 43 | Ne semble pas remarquer quand quelqu'un lui touche le bras ou le dos. | | | | | | | | | | |
|  | E | 44 | Evite de porter des chaussures ; adore être pieds nus. | | | | | | | | | | |
|  | E | 45 | Touche les gens ou les objets. | | | | | | | | | | |
|  | E | 46 | Ne semble pas remarquer quand son visage ou ses mains sont sales. | | | | | | | | | | |
| Note brute totale de la section | | | | | | | | | | | | | |

Commentaires :

HTKS

- **Administration :**

- Des instructions spécifiques sont destinées à l’évaluateur, elles sont en italiques et elles ne doivent pas être lues à l’enfant.
- Les dialogues à lire à l’enfant sont généralement situés dans une zone de texte encadrée et sont en gras. Ne pas modifier ou ajouter de dialogues (la seule exception est pour la partie pratique où les évaluateurs sont invités à fournir des avis concernant les bonnes réponses).
- Ne jamais donner de commentaires pendant la partie « *testing* » (uniquement pendant la partie introduction et pratique).
- Attention à ne pas donner de repère à l’enfant au cours de la partie « *testing* ». Après avoir lu l’introduction à voix haute, regarder directement les yeux de l’enfant. Ne pas chercher à regarder sa tête, ses pieds, ses genoux ou ses épaules.
- Montrer la bonne réponse quand vous voyez (lors de l’introduction et la pratique) :
- Ne pas répéter un item, sauf si l’enfant indique qu’il n’a pas entendu les instructions.
- Ne pas pénaliser un enfant qui réfléchit sur là où il va placer ses mains. Tant que l’enfant ne bouge pas pour toucher la partie incorrecte avant de toucher la bonne partie de son corps, l’enfant doit recevoir deux points.
- Administrer la tâche d’un ton positif et optimiste. Les enfants doivent jouer de bonne humeur.



- **L’environnement de passation :**

- Trouver un lieu de passation calme isolé. Aucun autre enfant ne doit être dans la même pièce que l’enfant testé.
- L’enfant doit-être à « 3 pieds » de vous. Administrer la tâche soit assis soit debout, mais assurez-vous que vous êtes face à la vue de l’enfant.
- Il n’est pas nécessaire de forcer l’enfant à rester au même endroit lors du test, tant que l’enfant fasse attention à vous et à la tâche.

- **Consignes de cotation :**

| Scores | Règles | Exemples |
|--------|---|--|
| 0 | L’enfant touche la mauvaise partie du corps et ne s’auto-corrige pas. | L’évaluateur dit « touche tes genoux ». L’enfant atteint rapidement ses épaules, mais change ensuite et touche ses genoux. |

| | | |
|----------|---|---|
| 1 | L’enfant touche d’abord la mauvaise partie de son corps, ou du moins y tend, puis se rend compte de son erreur et s’auto-corrige. | L’évaluateur dit « touche tes épaules ». L’enfant secoue brièvement ses mains en direction de ses épaules mais place rapidement ses mains vers le bas et se penche pour toucher ses genoux. |
| 2 | L’enfant produit la bonne réponse, c’est-à-dire l’opposé de ce qui est demandé | L’évaluateur dit « touche tes pieds ». L’enfant regarde vers le bas, mais ne se courbe pas. Après un moment de réflexion, l’enfant pose les deux mains sur sa tête. |

- **L’administration d’HTKS : questions diverses :**

1-Est-ce qu’on est autorisé à répéter une commande s’il nous manque la réponse d’un enfant ?

Nous devons répéter une commande que s’il y a trop de bruit, s’il est évident que l’enfant ne nous écoute pas, ou s’il agit comme s’il n’a pas entendu ce qu’on vient de dire. Cela arrive rarement et ne crée pas de différences dans les résultats. Dans les rares occasions où nous ratons une réponse nous demandons à l’enfant de nous montrer de nouveau.

2-Est-ce qu’on est autorisé à répéter une commande si l’enfant n’entend pas ce qu’on dit et nous demande de répéter ?

Oui, nous lui répétons la commande s’il ne l’entend pas.

3-Quelle cotation doit-on utiliser si l’enfant ne bouge pas du tout ou refuse de participer pour le test ?

Si après lui avoir répété la commande, l’enfant ne bouge toujours pas, nous cotons faux puis nous continuons à faire passer la tâche.

4-Comment coter la réponse d’un enfant s’il se contente de déplacer ses mains dans les deux sens continuellement, c’est-à-dire de sa tête à ses pieds ?

Nous attendons jusqu’à ce qu’il finisse et nous continuons à administrer la tâche. Après tout, être capable d’écouter, de prêter attention et de se rappeler les instructions est exigé pour la tâche.

- **Exemples et suggestions de cotation :**

Pour les exemples suivants, on suppose que l'enfant a ses mains sur sa tête au début de la passation.

| Commande | Réponse de l'enfant | Score |
|------------------|---|-------|
| Touche tes pieds | L'enfant garde ses mains sur sa tête | 2 |
| Touche tes pieds | L'enfant soulève brièvement ses mains de sa tête vers le haut et ne fait pas de mouvement vers le bas, vers ses pieds, et replace alors ses mains sur sa tête | 2 |
| Touche tes pieds | L'enfant enlève ses mains de sa tête et les déplace brièvement vers le bas, avant de remettre ses mains sur sa tête | 1 |
| Touche ta tête | L'enfant garde ses mains sur sa tête | 0 |
| Touche ta tête | L'enfant enlève ses mains de sa tête et touche ses pieds | 2 |
| Touche ta tête | L'enfant enlève ses mains de sa tête mais commence à bouger ses mains vers sa tête, puis ensuite touche ses pieds | 1 |

- **Références :**

- Cameron Ponitz, C. E., McClelland, M. M., Jewkes, A. M., Connor, C. M., Farris, C. L., & Morrison, F. J. (2008). Touch your toes! Developing a direct measure of behavioral regulation in early childhood. *Early Childhood Research Quarterly*, 23(2), 141-158. doi: 10.1016/j.ecresq.2007.01004
- Cameron Ponitz, C. E., McClelland, M. M., Mathews, J. S., & Morrison, F. (2009). A structured observation of behavioral self-regulation and its contribution to kindergarten outcomes. *Developmental Psychology*, 45(3), 605-619. doi: 10.1037/a0015365
- McClelland, M. M., Cameron Ponitz, C. E., Connor, C. M., Farris, C. L., Jewkes, A. M., & Morrison, F. J. (2007). Links between behavioral regulation and preschoolers' literacy, vocabulary, and math skills. *Developmental Psychology*, 43(2), 947-959. doi: 10.1037/0012-1649.43.4.947
- McClelland, M. M., Cameron Ponitz, C. E., Duncan, R., Bowles, R. P., Acock, A. C., Miao, A., & Pratt, M. E. (2014). Predictors of early growth in academic achievement: The head-toes-knees-shoulders task. *Frontiers in Psychology*, 5(599), 599-612. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00599

TÊTE-PIEDS-GENOUX-ÉPAULES (FORME A)

Partie I: INTRODUCTION (GS & CP)

Maintenant, on va jouer à un jeu. Le jeu à deux parties. En premier, je veux que tu fasses la même chose que moi. Touche ta tête.

Attendre que l’enfant ait mis ses deux mains sur sa tête.



Parfait ! maintenant, touche tes pieds.

Attendre que l’enfant ait mis ses deux mains sur ses pieds.



Parfait!

Répéter les deux commandes avec des mouvements, jusqu’à ce que l’enfant imite correctement.

Partie I : PRATIQUE

Maintenant nous allons être un peu fous et on va faire l’opposé de ce que je dis. Quand je dis de toucher ta tête, au lieu de toucher ta tête, tu vas toucher tes pieds. Quand je dis de toucher tes pieds, tu touches ta tête. Donc tu fais quelque chose de différent de ce que j’ai dit.



Si l’enfant répond correctement : il est nécessaire de fournir un feedback positive sur chaque item de pratique ou l’enfant répond correctement : parfait !

Si l’enfant répond incorrectement : à tout moment durant la partie pratique, on peut donner jusqu’à 3 explications supplémentaires avant le début de la partie testing.

Souviens-toi, quand je te dis touche ta tête, toi tu touches tes pieds donc tu dois faire quelque chose de différent de ce que j’ai dit. Essayons encore une fois.

.....
→Nombre d’explication supplémentaire donnée : 0 1 2 3

| | | | |
|--|---------------------|---|-----------|
| A1. Qu’est-ce que tu dois faire si je te dis « touche ta tête » ? | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| A2. Qu’est-ce que tu dois faire si je te dis « touche tes pieds » | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |

Bien, nous allons continuer encore un peu.

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|---|-----------|
| B1. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| B2. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |
| B3. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| B4. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |

Passer à la partie I testing. Ne pas expliquer la tâche à nouveau. Ne plus donner de feedback.

Partie I : TESTING

On continue à jouer à ce jeu, et toi tu continues à faire le contraire de ce que je dis !

| | | | |
|----------------------|---------------------|---|-----------|
| 1. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| 2. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |
| 3. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |
| 4. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| 5. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |
| 6. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| 7. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| 8. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |
| 9. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| 10. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |

Partie I : COTATION

Somme des items A1-A2 :

Somme des items B1-B4 :

Somme des items d’introduction et de pratique (A1-B4) :

Score final partie I (Somme des items 1-10) :

Administrer la partie II si l’enfant a répondu correctement à 5 items ou plus de la partie I ou s’il est en grande section de maternelle.

Partie II : INTRODUCTION (GS & CP)

Ok, maintenant que tu as bien compris cette première partie, on va en rajouter une autre.

Maintenant, tu vas toucher tes épaules et tes genoux. En premier, touche tes épaules.

Toucher ses propres épaules, attendre que l'enfant touche les siennes avec ses deux mains.



Maintenant, touche tes genoux.



Toucher ses propres genoux, attendre que l'enfant touche les siens avec ses deux mains.

Répéter les deux commandes alternatives avec mouvement, jusqu'à ce que l'enfant imite correctement.

Partie II : PRATIQUE

Maintenant nous allons être encore un peu fous et tu vas continuer à faire l'opposé de ce que je dis. Mais cette fois, tu vas toucher tes épaules et tes genoux. Quand je dis de toucher tes genoux, tu touches tes épaules. Quand je dis de toucher tes épaules, tu touches tes genoux.

Si l'enfant répond correctement : il est nécessaire de fournir un feedback positive sur chaque item de pratique ou l'enfant répond correctement : parfait !

Si l'enfant répond incorrectement : à tout moment durant la partie pratique, on peut donner jusqu'à 2 explications supplémentaires avant le début de la partie testing.

N'oublie pas, quand je te dis de toucher tes genoux, au lieu de toucher tes genoux, tu touches tes épaules. Je veux que tu fasses l'opposé de ce que je dis.

.....
→Nombre d'explication supplémentaire donnée : 0 1 2

| | | | |
|---|----------------------|---|-------------|
| C1. Qu'est-ce que tu dois faire si je te dis « touche tes genoux » ? | 0 (autre qu'épaules) | 1 | 2 (épaules) |
| D1. Touche tes genoux | 0 (autre qu'épaules) | 1 | 2 (épaules) |
| D2. Touche tes épaules | 0 (autre que genoux) | 1 | 2 (genoux) |
| D3. Touche tes genoux | 0 (autre qu'épaules) | 1 | 2 (épaules) |
| D4. Touche tes épaules | 0 (autre que genoux) | 1 | 2 (genoux) |

Passer à la partie II testing. Ne plus donner d'explication. Ne plus donner de feedback.

Partie II : TESTING

Maintenant que tu connais toutes les parties, on va tout mettre ensemble ! Tu continues à faire le contraire de ce que je te dis, mais tu ne sais pas ce que je vais te demander.

Il y a quatre choses que je peux te demander.

Si je te dis, touche ta tête, tu touches tes pieds.

Si je dis, touche tes pieds, tu touches ta tête.

Si je te dis, touche tes genoux, tu touches tes épaules.

Si je te dis, touche tes épaules, tu touches tes genoux.



Est-ce que tu es prêt ? on y va !

| | | | |
|------------------------|----------------------|---|-------------|
| 11. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| 12. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |
| 13. Touche tes genoux | 0 (autre qu'épaules) | 1 | 2 (épaules) |
| 14. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |
| 15. Touche tes épaules | 0 (autre que genoux) | 1 | 2 (genoux) |
| 16. Touche ta tête | 0 (autre que pieds) | 1 | 2 (pieds) |
| 17. Touche tes genoux | 0 (autre qu'épaules) | 1 | 2 (épaules) |
| 18. Touche tes genoux | 0 (autre qu'épaules) | 1 | 2 (épaules) |
| 19. Touche tes épaules | 0 (autre que genoux) | 1 | 2 (genoux) |
| 20. Touche tes pieds | 0 (autre que tête) | 1 | 2 (tête) |

Partie II : COTATION

Score à C1 :

Somme des items D1-D4 :

Somme des items d'introduction et de pratique (C1-D4) :

Score final partie II (Somme des items 11-20) :

Partie I+ Partie II : COTATION

Somme des items d'introduction et de pratique (A1-D4) :

Score final HTKS Parties I+ II (1-20) :

Planche 1 : condition contrôle animaux

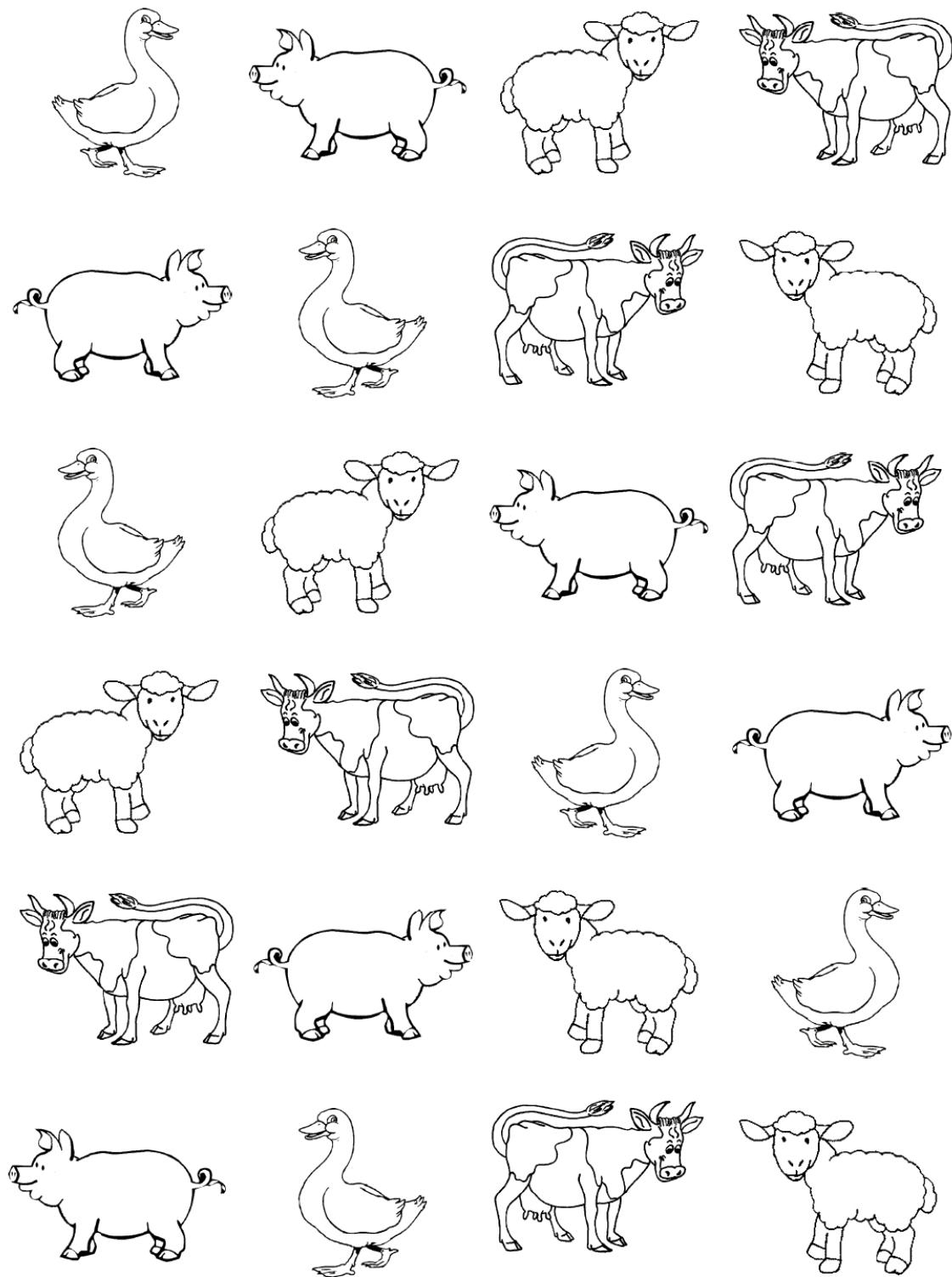


Planche 2 : condition contrôle visages

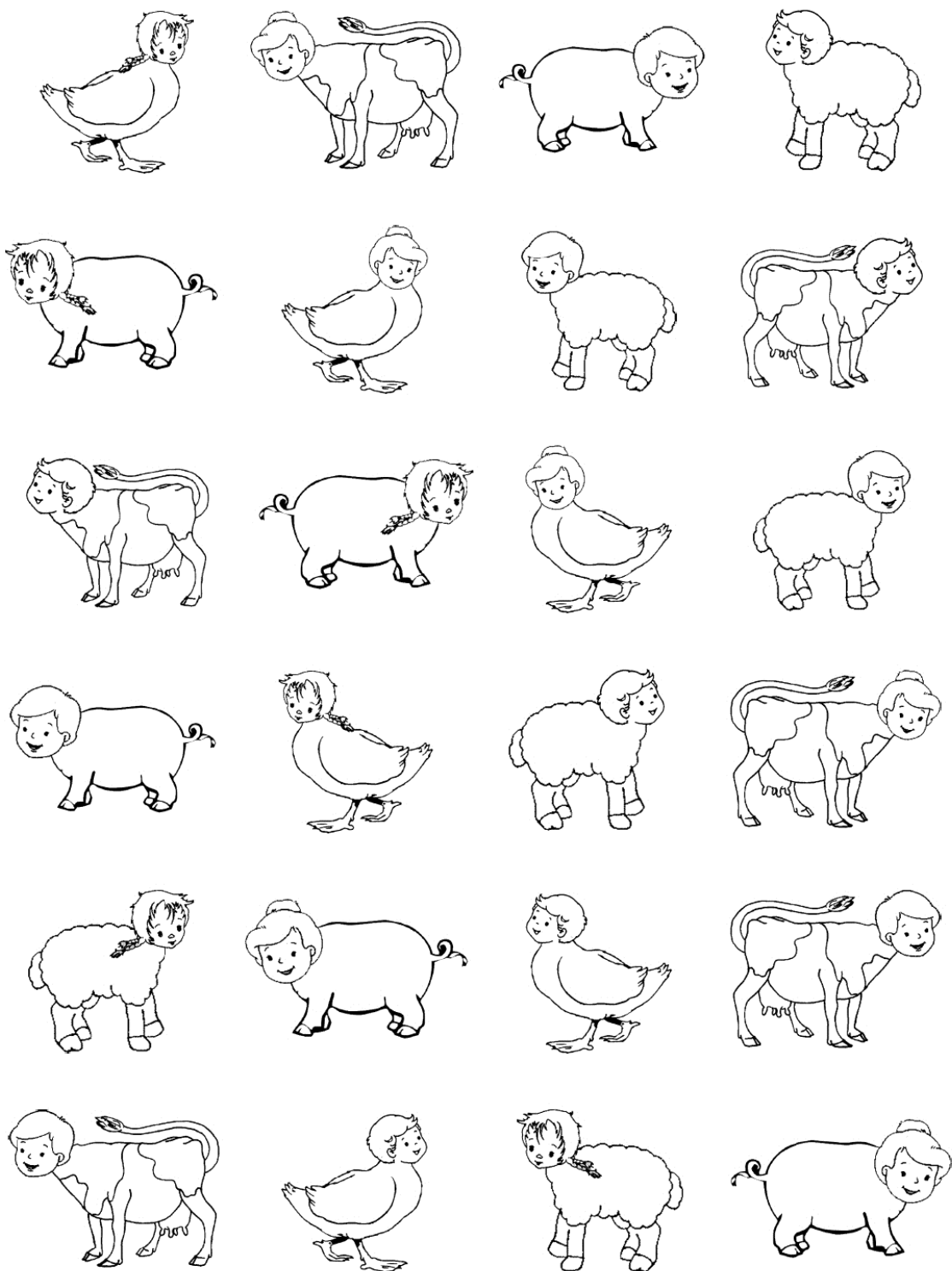
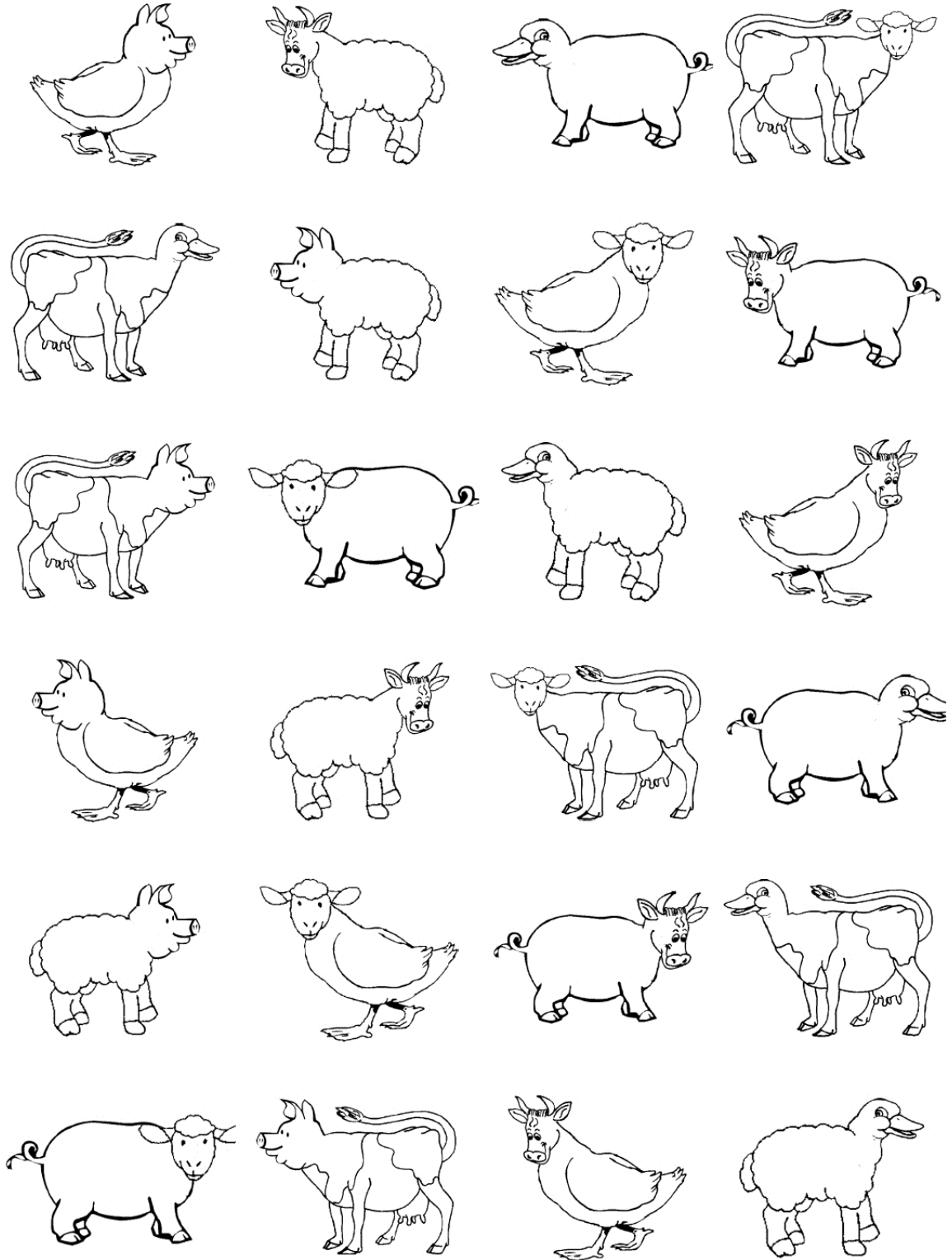


Planche 3 : Condition incongruente



Stroop animaux

Nom du sujet : _____ Date de naissance : _____
 Classe : _____ Age : _____

























Vérifier que l'enfant connaît les quatre animaux présentés.
 Faire corriger et noter les erreurs au fur et à mesure.

Images congruentes : « je vais te montrer des images d'animaux, je voudrais que tu me dises leur nom aussi bien et aussi vite que tu peux, en lisant de gauche à droite et ligne par ligne, sans t'arrêter entre chaque animal. »

Contrôle visage : « je vais te montrer des images étranges, la tête des animaux est différente de leur corps. Ils auront une tête de personnage de dessin animé. Tu vas devoir donner le nom du corps des animaux aussi bien et aussi vite que tu peux, en allant de gauche à droite et ligne par ligne, sans t'arrêter entre chaque animal. » Montrer l'exemple avec une tête de BD et un corps de cheval, ici tu devrais dire cheval.

Images incongruentes : « je vais te montrer d'autres images étranges, la tête des animaux est différente de leur corps. Ils ont la tête d'un autre animal. Tu vas devoir me dire le nom du corps de l'animal aussi bien et aussi vite que tu peux, en allant de gauche à droite et ligne par ligne, sans t'arrêter entre chaque animal. » Montrer l'exemple cheval avec une tête de chat.

Images congruentes : Temps planche =

| | | | |
|---|---|---|---|
| Canard  | Cochon  | Mouton  | Vache  |
| Cochon  | Canard  | Vache  | Mouton  |
| Canard  | Mouton  | Cochon  | Vache  |
| Mouton  | Vache  | Canard  | Cochon  |
| Vache  | Cochon  | Mouton  | Canard  |
| Cochon  | Canard  | Vache  | Mouton  |

Images contrôle visage : Temps planche =

| | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Canard <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> |
| Cochon <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> |
| Vache <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> |
| Cochon <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> |
| Mouton <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> |
| Vache <input type="checkbox"/> | canard <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> |

Images incongruentes : Temps planche =

| | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Canard <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> |
| Vache <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> |
| Vache <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> |
| Canard <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> |
| Mouton <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> | Cochon <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> |
| Cochon <input type="checkbox"/> | Vache <input type="checkbox"/> | Canard <input type="checkbox"/> | Mouton <input type="checkbox"/> |

Publications et communications résultant du travail de thèse

- *Articles dans des revues nationale ou internationale à comité de lecture (ACL)*

ACL 01 **Anquetil, M.,** Roche-Labarbe, N., & Rossi, S. (2023). Tactile sensory processing as a precursor of executive attention : Toward early detection of attention impairments and neurodevelopmental disorders. *WIREs Cognitive Science*, e1640. <https://doi.org/10.1002/wcs.1640> Scimago-Scopus Q1 IF 5.071

- *Communications orales sélectionnées sur abstract (COM)*

COM 06 Dumont, V., Marais, A-L., **Anquetil, M.,** Trentesaux, A-S. et Roche-Labarbe, N. (2023). Étude électroencéphalographique des capacités de régulation du traitement sensoriel dans la modalité tactile chez le nouveau-né prématuré : un marqueur néonatal pertinent du risque neurodéveloppemental ? Journées Francophones de Recherche en Néonatalogie, Paris, France.

COM 05 Marais, A-L., **Anquetil, M.,** Dumont, V. & Roche-Labarbe, N. (2023). Evoked brain responses to prediction in typical and atypical children from 2 to 6 years of age. SPNC, Caen, France.

COM 04 **Anquetil, M.,** Marais, A-L., Dumont, V., Roche-Labarbe, N. & Rossi, S. (2023). Executive Attention development and tactile Sensory Prediction: Perspectives for understanding Neurodevelopmental Disorders. 23rd Conference of the European Society for Cognitive Psychology, Porto, Portugal.

COM 03 Roche-Labarbe, N., Dumont, V., Marais, A-L., **Anquetil M.,** & Trentesaux, A-S. (2023). Top-down regulation of somatosensory processing in the premature neonate brain as an early marker of neurodevelopmental susceptibility. *Mapping the impact of early life adversity on sensory processing through the sensitive periods of infancy, adolescence, and pregnancy*. Flux 2023, Santa Rosa, CA, United States.

COM 02 **Anquetil, M.,** Dumont, V., Marais, A-L., Roche-Labarbe, N. & Rossi, S. (2022). Traitement de l'information sensorielle tactile et attention exécutive chez les enfants d'âge préscolaire aux profils développementaux variés. 14e colloque international RIPSYDEVE, Montpellier, France.

COM 01 **Anquetil, M.** (2022). Le toucher sert-il de base au développement de l'attention? 47e congrès en ligne de l'Institut des troubles d'apprentissage.

- *Communications affichées sélectionnées sur abstract (COM-AFF)*

- COM-AFF 15** Marais, A-L., Dumont, V., **Anquetil, M.**, Trentesaux, A-S. & Roche-Labarbe, N. (2023). *Evoked brain responses to repetition, deviance and omission of tactile stimuli in a sequence in premature neonates*. Flux 2023, Santa Rosa, CA, United States.
- COM-AFF 14** Marais, A-L., **Anquetil, M.**, Dumont, V. & Roche-Labarbe, N. (2023). Somatosensory prediction from birth to four years old in typical and atypical children. OHBM 2023, Montréal, Canada.
- COM-AFF 13** **Anquetil, M.**, Marais, A-L., Dumont, V., Roche-Labarbe, N., Rossi, S. (2023). Tactile sensory prediction and executive attention development at preschool age: perspectives for understanding neurodevelopmental disorders. Journée Normande de Recherche Biomédicale 2023, Caen, France.
- COM-AFF 12** Dumont, V., Marais, A-L., **Anquetil, M.**, Rossi, S., Trentesaux, A-S. & Roche-Labarbe, N. (2023). The study of brain tactile perception as neonatal precursors of neurodevelopment in preterm infants. Journée Normande de Recherche Biomédicale 2023, Caen, France.
- COM-AFF 11** Marais, A-L., **Anquetil, M.**, Dumont, V. & Roche-Labarbe, N. (2023). Somatosensory prediction in typical children. Journée Normande de Recherche Biomédicale 2023, Caen, France.
- COM-AFF 10** Marais, A-L., Dumont, V., **Anquetil, M.**, Rossi, S., Trentesaux, A-S. & Roche-Labarbe, N. (2022). Simultaneous EEG-fNIRS to explore somatosensory prediction in the premature neonate brain. fNIRS 2022, Boston, USA.
- COM-AFF 09** **Anquetil, M.**, Dumont, V., Marais, A-L., Roche-Labarbe, N. & Rossi, S. (2022). Sensory Prediction and Repetition Suppression in the tactile modality as early markers of executive attention development at preschool age. Flux 2022, Paris, France.
- COM-AFF 08** Dumont, V., Marais, A-L., **Anquetil, M.**, Rossi, S., Trentesaux, A-S., Roche-Labarbe, N. (2022). Investigating tactile processing precursors of cognitive development in the premature newborn brain. Flux 2022, Paris, France.
- COM-AFF 07** Marais, A-L., Dumont, V., **Anquetil, M.** & Roche-Labarbe, N. (2022). Somatosensory prediction among preschool children: a cross-sectional study. Flux 2022, Paris, France.
- COM-AFF 06** **Anquetil, M.**, Dumont, V., Marais, A-L., Roche-Labarbe, N. & Rossi, S. (2022). Is tactile perception related with attention development? 22nd Conference of the European Society for Cognitive Psychology Lille, France.

- COM-AFF 05** Marais, A-L., **Anquetil, M.**, Dumont, V. & Roche-Labarbe, N. (2022). Somatosensory prediction in preschool children: a preliminary ERP study. OHBM 2022, Glasgow, Ecosse.
- COM-AFF 04** **Anquetil, M.**, Dumont, V., Marais, A-L., Roche-Labarbe, N. & Rossi, S. (2022). Le traitement sensoriel tactile est-il lié au développement de l'attention chez les enfants d'âge préscolaire ? Journée Normande de Recherche Biomédicale 2022, Rouen, France.
- COM-AFF 03** Dumont, V., Marais, A-L., **Anquetil, M.**, Rossi, S., Trentesaux, A-S. & Roche-Labarbe, N. (2022). Précurseurs néonataux du neurodéveloppement : traitement somatosensoriel et cognitif des stimuli tactiles non douloureux dans le cerveau du nouveau-né prématuré avant l'âge équivalent du terme. Journée Normande de Recherche Biomédicale 2022, Rouen, France.
- COM-AFF 02** **Anquetil, M.**, Roche-Labarbe, N. & Rossi, S. (2021). Le traitement de l'information sensorielle tactile : un marqueur de développement de l'attention exécutive chez l'enfant d'âge préscolaire ? 61e Congrès de la Société Française de Psychologie, Tours, France.
- COM-AFF 01** Marais, A-L., Dumont, V., **Anquetil, M.**, Roche-Labarbe, N. (2021). Simultaneous EEG-fNIRS to explore sensory prediction as a screening tool for neurodevelopmental disorders. Cutting EEG, Aix-en-Provence, France.

Activités connexes au travail de thèse

- *Vulgarisation scientifique*

- 2023** Participation au programme « Atelier des Chercheurs » : présenter la recherche auprès d'un public scolaire (1 intervention).
- 2022** Participation au programme « Atelier des Chercheurs » : présenter la recherche auprès d'un public scolaire (1 intervention).
- Participation à l'évènement « Chercheurs, chercheuses » : animation d'un stand et ateliers ludiques autour de la recherche en psychologie auprès de jeunes enfants, Le Dôme, Caen.
- Animation d'un atelier de recherche participative : « Décodons l'attention à l'aide du toucher », Le Dôme, Caen.
- Co-rédaction d'un article de vulgarisation scientifique pour le blog « Kidiscience » : Le toucher c'est important pour grandir.
- 2021** Ambassadrice de la Recherche Normande - Programme "Réflexion.s : instantanés de recherche".
- Conférence grand public lors de l'évènement "Chercheurs, chercheuses" : "Décodons l'attention à l'aide du toucher", Le Dôme, Caen.
- Candidate au sein de l'équipe DECODE au concours Têtes Chercheuses, prix de culture scientifique, technique et industrielle en Normandie : Projet PRESTON (PRÉdiction Sensorielle du Toucher chez le NOUveau-né), Caen.
- Participation au programme « Atelier des Chercheurs » : présenter la recherche auprès d'un public scolaire (2 interventions).
- Reportage de l'équipe de recherche DECODE « Quand le toucher éveille au monde », article INSERM Magazine numéro 51.
- 2020** Participation au programme « Atelier des Chercheurs » : présenter la recherche auprès d'un public scolaire (3 interventions).
- Participation à la journée « Chercheurs, chercheuses » : animation d'un stand grand public, Le Dôme, Caen.
- 2019** Participation à la Fête de la Science animation d'un atelier "Cerveau et apprentissages".

- *Activité pédagogique*

Enseignements en formation initiale (Université de Caen Normandie)

- 2023-2024** TD Licence 3 Psychologie UE23 « *Approches contemporaines et psychopathologie du développement* » (48h)
 TD Licence 1 Psychologie UE3 « *Introduction aux pathologies* » (24h)
 CM Licence 1 Psychologie UE7 « *Individus groupes et sociétés* » (16h)
 TD Licence 1 Psychologie UE7 « *Individus groupes et sociétés* » (48h)
 CM Licence 1 Psychologie UE 8 « *Interactions et communication* » (20h)
 TD Licence 1 Psychologie UE 8 « *Interactions et communication* » (12h)
- 2021-2022** TD Licence 2 Psychologie UE17 « *Attention, fonctions exécutives et mémoire de travail* » (8h)
 TD Licence 3 Psychologie UE26 « *Approches contemporaines du développement précoce et psychopathologie développementale* » (16h)
- 2020-2021** TD Licence 3 Psychologie UE26 « *Approches contemporaines du développement précoce et psychopathologie développementale* » (56h)

Encadrement des Travaux D'Études et de Recherche (Université de Caen Normandie)

2023-2024 Encadrement de deux Travaux d'Etude et de Recherche de Licence 3

Encadrement d'un mémoire de Master 2 mention Psychologie de l'éducation

Supervision d'un stage professionnel de Master 2 mention Psychologie de l'éducation

2020-2021 Co-encadrement Travail d'Etude et de Recherche de Master 1

« Le développement sensoriel vu comme un précurseur du développement de l'attention exécutive chez des enfants placés en foyer », Travail d'étude et de recherche de Master 1 de Psychologie de l'éducation, co-encadré avec Sandrine Rossi, Université de Caen

« Profil sensoriel et développement de l'attention chez des enfants d'âge préscolaire et des enfants déficients intellectuels », Travail d'étude et de recherche de Master 1 de Psychologie de l'enfant, de l'adolescent et de la famille, co-encadré avec Nadège Roche-Labarbe, Université de Caen

2019-2020 « L'impact du développement du réseau attentionnel d'orientation sur le réseau attentionnel exécutif à l'âge préscolaire », Travail d'étude et de recherche de Master 1 Psychologie de l'éducation, co-encadré avec Sandrine Rossi, Université de Caen

- *Responsabilités administratives*

2023 **Membre du comité d'organisation de l'évènement Master Doc' au sein de l'ED 556 HSRT** : rencontres et tables rondes entre étudiants de master et doctorants pour promouvoir la formation doctorale et la diversité des parcours en fonction de la discipline (Université de Caen Normandie, France).

2022 **Membre du groupe de travail à la diffusion de la culture scientifique (CSTI)** au sein du collège des écoles doctorales normandes en partenariat avec l'association Normandie Doc'.

Représentante suppléante des doctorants au conseil de l'école doctorale 556 HSRT (Université de Caen Normandie, France).

2021-2022 **Co-organisation de l'opération de vulgarisation scientifique « Rendez-vous avec un.e chercheur.se » organisé lors la Fête de la Science** en partenariat avec Le Dôme de Caen et le réseau de bibliothèques départementales de Normandie.

2021-2023 **Secrétaire de l'association Normandie Doc'** : Association de doctorants et de docteurs de la Région Normandie.

Représentante titulaire des doctorants au conseil du Laboratoire de Psychologie Caen Normandie (LPCN UR 7452, Université de Caen Normandie, France).

- *Travail clinique*

Mai 2023 - Psychologue au sein de l'Institut Médico Éducatif L'Espoir, Bayeux (14) – Unité Autisme Equinoxe (0.25 ETP). Prise en charge de 6 jeunes avec troubles du spectre de l'autisme.

Mars-Juil 2023 Psychologue en ITEP et SESSAD - Association des Amis de Jean Bosco, DITEP Vallée de l'Odon (14). Poste de neuropsychologue (0.5 ETP) de mars à juillet 2023.

Bilans psychométriques (WISC-V, NEPSY-II) et évaluations spécifiques portant sur l'attention et les fonctions exécutives (Tea-Ch, BRIEF). Participation aux réunions pluridisciplinaires et aux projets personnalisés d'accompagnement.

RÉSUMÉ

Titre : Marqueurs de développement de l'attention exécutive chez l'enfant d'âge préscolaire

Résumé : L'attention exécutive se développe considérablement durant la période préscolaire, période à laquelle peuvent se manifester les premiers signes de trajectoires développementales atypiques. Des troubles de l'attention exécutive conjointement à des atypies sensorielles, notamment tactiles, sont fréquemment rapportés dans les troubles neurodéveloppementaux. L'objectif de ce travail de thèse était d'explorer les liens entre attention exécutive et traitement sensoriel tactile chez des enfants d'âge préscolaire. Dans une première étude, nous avons mis en évidence un lien entre le score de traitement sensoriel tactile, mesuré par le questionnaire du Profil Sensoriel de Dunn, et le score composite exécutif global de la BRIEF-P. Pour explorer ultérieurement ce lien au niveau cérébral auprès de notre population d'étude, nous avons adapté une tâche informatisée d'attention exécutive, nommée la *Preschool-ANT*, compatible avec des mesures en EEG. Dans une seconde étude, nous avons mis à profit ce nouvel outil pour évaluer en EEG les liens entre attention exécutive et traitement sensoriel tactile. Nous avons conçu un paradigme vibrotactile de type *oddball*-omission pour mesurer la prédiction sensorielle et son mécanisme associé, la suppression par répétition. Nous mettons en évidence des liens entre suppression par répétition tactile et réponses au conflit à la *Preschool-ANT* en région fronto-centrale. De plus, la suppression par répétition tactile en région somatosensorielle est corrélée à l'inhibition et la planification en situation de vie quotidienne (BRIEF-P). Enfin, la détection de stimuli tactiles déviants montrait des liens à la fois avec la différence des réponses neurales positives tardives de la *Preschool-ANT* et le contrôle émotionnel en situation de vie quotidienne (BRIEF-P). Ce travail de thèse souligne la pertinence d'étudier, dès le plus jeune âge, la qualité du traitement sensoriel tactile pour comprendre l'évolution vers des trajectoires développementales atypiques. Il offre des perspectives pour concevoir de nouveaux outils d'évaluation et des interventions précoces ciblées sur les troubles sensoriels, pour conjointement réduire leur impact et prévenir les troubles attentionnels.

Mots-clés : attention exécutive, traitement sensoriel tactile, prédiction sensorielle, neuroconstructivisme, troubles neurodéveloppementaux

Title: Developmental markers of executive attention at preschool age

Abstract: Executive attention develops rapidly during the preschool period, during which the first signs of atypical developmental trajectories can appear. Executive attention disorders, along with sensory atypicalities, particularly tactile, are frequently reported in neurodevelopmental disorders. The aim of this doctoral work was to explore the connections between executive attention and tactile sensory processing in preschool-aged children. In a first study, we identified a relationship between the tactile sensory processing score, measured by the Dunn Sensory Profile questionnaire, and the BRIEF-P overall executive composite score. To further investigate this connection at the neural level within our study population, we adapted a computerized executive attention task called the *Preschool-ANT*, which is compatible with EEG measurements. In a second study, we utilized this new tool to assess the links between executive attention and tactile sensory processing in EEG. We designed a vibrotactile *oddball*-omission paradigm to measure sensory prediction and its associated mechanism, repetition suppression. We found links between tactile repetition suppression and conflict responses in the *Preschool-ANT* in the fronto-central region. Furthermore, tactile repetition suppression in the somatosensory region is correlated with inhibition and planning in everyday life situations (BRIEF-P). Lastly, the detection of deviant tactile stimuli showed links both with the difference in late positive neural responses in the *Preschool-ANT* and emotional control in daily life situations (BRIEF-P). This doctoral work emphasizes the importance of studying the quality of tactile sensory processing from a very young age to understand the emergence of atypical developmental trajectories. It offers new perspectives for designing new assessment tools and promoting early interventions targeting sensory disorders to simultaneously reduce their impact and prevent attentional disorders.

Keywords: executive attention, tactile sensory processing, sensory prediction, neuroconstructivism, neurodevelopmental disorders
