



**HAL**  
open science

# Le fonctionnement cognitif des enfants et adolescents à haut potentiel intellectuel : investigation de la mémoire de travail et des réseaux attentionnels

Alexandre Aubry

► **To cite this version:**

Alexandre Aubry. Le fonctionnement cognitif des enfants et adolescents à haut potentiel intellectuel : investigation de la mémoire de travail et des réseaux attentionnels. Psychologie. Université de Picardie Jules Verne, 2018. Français. NNT : 2018AMIE0063 . tel-03692035

**HAL Id: tel-03692035**

**<https://theses.hal.science/tel-03692035>**

Submitted on 9 Jun 2022

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

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



## **THÈSE DE DOCTORAT**

présentée à l'École Doctorale en Sciences Humaines et Sociales (ED 586)  
de l'Université de Picardie Jules Verne

par

**M. Alexandre AUBRY**

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne  
(Arrêté du 7 août 2006)

**Le fonctionnement cognitif  
des enfants et adolescents à haut potentiel intellectuel :  
Investigation de la mémoire de travail  
et des réseaux attentionnels**

**Soutenue le 30 novembre 2018,  
après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :**

**Béatrice BOURDIN**

Professeur, Université de Picardie Jules Verne (Directrice de thèse)

**Élisabeth DEMONT**

Professeur, Université de Strasbourg (Rapporteur)

**Jacques GRÉGOIRE**

Professeur, Université Catholique de Louvain (Rapporteur)

**Sylvie TORDJMAN**

Professeur, Université de Rennes 1 (Examineur)

**Luc VANDROMME**

Professeur, Université de Picardie Jules Verne (Examineur)

Thèse co-financée par le Conseil Régional de Hauts-de-France et les Fonds Européens du Développement Régional dans le cadre du projet structurant HPISCOL « Enfants et adolescents à haut potentiel : identification et scolarisation »



*"The enemy of science is not religion... The true enemy is the substitution of  
thought, reflection, and curiosity with dogma."*

Frans de Waal





## REMERCIEMENTS

Cette thèse doit son existence à la participation des enfants, des adolescents et des étudiants. Je tiens à les remercier vivement ainsi que leur famille d'avoir accepté de contribuer à ce travail de recherche.

Mes remerciements vont à Professeure Béatrice BOURDIN. Je te remercie pour ta confiance et ton soutien. Tu m'as donné l'opportunité de m'épanouir dans ce travail de thèse. Tu m'as permis de concrétiser un rêve. Tu m'as protégé durant tout ce travail. Tu m'as également permis de faire des collaborations et d'être autonome dans la réalisation de mes protocoles de recherche. J'ai pu apprendre de mes erreurs et savourer mes réussites. Tu as toujours été calme, même quand ton doctorant arrivait, tombant trébuchant, dans ton bureau en pensant avoir fait une découverte révolutionnaire. Je sais qu'il n'était pas toujours facile de canaliser mon enthousiasme, mais également mes doutes perpétuels. Tu as réussi à aiguïser ma curiosité scientifique et à calmer mes envies de créer chaque jour de nouveaux protocoles. Tout le monde me disait que j'avais de la chance d'avoir une directrice aux innombrables qualités scientifiques et humaines. J'ai pu les constater chaque jour durant ce travail de thèse.

Je tiens à remercier les Professeurs Élisabeth DEMONT et Jacques GRÉGOIRE de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse et d'être les examinateurs de mon travail. Je remercie également Sylvie TORDJMAN et Luc VANDROMME d'avoir accepté de participer à mon jury de soutenance.

Mes remerciements vont également à la Région des Haut-de-France et aux Fonds Européen de Développement Régionale qui ont financé tout ce travail de thèse. Cette recherche n'aurait jamais eu cette ampleur sans l'implication d'Amélie COURTINAT-

CAMPS dans ce projet région HPISCOL. Grâce à toi, j'ai pu faire la connaissance de Florence PARÍS que je souhaite remercier chaleureusement. Sans ton aide, Florence, je n'aurais jamais pu réaliser un tel travail. Tu m'as ouvert les portes de nombreux établissements. Tu m'as permis également de rencontrer de nombreuses personnes impliquées dans le domaine du haut potentiel intellectuel. Je souhaite que ce travail de collaboration entrepris reste pérenne, car il reste tant à faire.

Je remercie également Catherine CUCHE et Sophie BRASSEUR pour leurs conseils et les discussions que nous avons pu avoir sur le haut potentiel intellectuel. Je tiens particulièrement à remercier Antoine KATTAR pour ses conseils et son soutien. J'ai vraiment apprécié notre collaboration.

Je remercie Philippe COCHE, Isabelle SAGE et Éric TURON-LAGOT de m'avoir aidé dans l'analyse des profils cognitifs aux échelles de Wechsler. Notre collaboration a été très fructueuse et j'ai beaucoup appris grâce à vos expériences cliniques. J'ai hâte de poursuivre notre collaboration dans de futures recherches.

Je tiens à remercier tous mes anciens collègues du CIO d'Amiens Nord qui m'ont proposé leur aide. Je remercie particulièrement Sophie BEAUJOUAN et Doriane MORIVAL pour leur aide précieuse durant ma thèse.

Je souhaite remercier Barbara MARTIN ainsi que sa petite famille de m'avoir accueilli dans leur maison durant mes passations. Tu as contribué grandement à ce travail de thèse. Je te remercie de fond du cœur.

Je remercie Aurore BANCAL et Martine CHAVANEAU de m'avoir ouvert leur dispositif d'intégration pour élèves précoces (DIEP). Vous faites un travail formidable pour ces enfants à besoins éducatifs particuliers.

Je remercie chaleureusement Jean-Pierre CARRON qui m'a toujours accueilli avec bonne humeur dans son établissement. Vous avez toujours le mot pour faire rire. Vous avez toujours été intéressé par nos préoccupations de recherches. C'était un réel plaisir de participer à vos réunions d'informations pour les parents des enfants à haut potentiel intellectuel.

Mes remerciements vont également à Cyril DOUAY, Stéphane FOLLET, Isabelle FRESNEAU, Gildas GRIFFON, Christine LANGLACÉ, André LEBLANC, Fabien MANIAK, Aurélien ODIOT et les directeurs d'écoles primaires pour m'avoir ouvert leur établissement durant ce travail de thèse. Je n'aurai jamais réussi à finir ce travail de recherche sans votre aide précieuse.

Je remercie également les étudiants de Master 1 qui m'ont aidé à récolter les données durant tout mon travail de thèse : Amélie COUPIGNY, Léo DUPLENNE, Léa DUPUIS, Amandine GELOEN, Julia JANUSZ, Jordan LERMONT, et Manon MALLARD.

Au sein du laboratoire, nous avons la chance d'avoir une salle dédiée aux doctorants et aux étudiants de Master 2. Cette salle est animée par une activité cérébrale accrue, mais également des contractions zygomatiques plus ou moins volontaires. L'ambiance est le plus souvent studieuse et parfois détendue grâce à ses autochtones d'une galaxie pas très lointaine. Je tiens ainsi à remercier les nouveaux et les anciens habitants de la E312 : Olive AGONDE AYELE, Laurie AMALRIC, Geoffrey BLONDELLE, Fabien CERROTTI, Federica CILIA, Loïc DESCHAMPS, Fannie GIBOT, Eli KPELLEY, Mike KOBİ, Perrine LECOINTE, Alexandre PORION, Nicolas RIBEIRO, Aristide RUTAYISIRE, Camille SAGNIER, Élodie VANDENBERGH, Dimitri VAST, Élodie De WEVER et Julie De WEVER. Nos discussions et nos débats ont toujours été agréables et très intéressants. Depuis le début, il y a toujours

une entre-aide et un esprit d'équipe. Cet état d'esprit a toujours été un fort soutien durant ce travail de thèse.

Au sein de l'équipe, chaque membre m'a apporté ses conseils issus de son expérience. Ainsi, je tiens à remercier particulièrement : Yannick GOUNDEN pour ses conseils concernant la valorisation de nos travaux ; Laurent HEURLEY pour les questions méthodologiques et ses anecdotes toujours passionnantes ; Laure IBERNON pour ses conseils toujours pragmatiques et souvent efficaces ; Barbara LE DRIANT pour sa confiance dans ma capacité à enseigner ; Véronique QUAGLINO pour ses questionnements épistémologiques et son enthousiasme.

Je remercie également Frédéric PACCAUT pour m'avoir donné la chance d'enseigner les statistiques, et d'avoir participer à la mise en place de l'enseignement du logiciel R. Ce fut une expérience enrichissante et passionnante.

Dans une vie, certaines rencontres nous changent profondément. En cela, je tiens à remercier Mathieu HAINSELIN. Ta volonté de nous sortir de nos dogmes et d'aiguiser notre esprit critique m'a profondément marqué. Tes conseils m'ont toujours été d'une grande aide et ils m'ont permis de m'améliorer.

Parmi les rencontres qui m'ont beaucoup changé, je tiens également à remercier Corentin GONTHIER. Notre collaboration a été fructueuse et enrichissante. Tu m'as beaucoup apporté et tu m'impressionnes encore. Tes connaissances semblent être sans limites. Tu as été très pédagogue envers moi. Cela m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances en statistiques et en programmation. En cela, je ne te remercierai jamais assez.

Je remercie Émilie LERICHE pour son influence sur la question de la mesure. Nos discussions épistémologiques m'ont toujours stimulé. Durant tout mon travail de thèse, ces questions m'ont toujours habité.

Mes remerciements vont également à Christine BOCÉREAN pour m'avoir aidé à intégrer le Master 2 à l'Université de Lorraine. Vous avez toujours été d'un grand soutien envers Claire et moi. Nous vous en serons toujours reconnaissants.

La thèse n'a pas toujours été un travail sans de courtes interruptions. Ces moments de détente ont également contribué à la réaliser de cette thèse. Je remercie ainsi Jérôme et Élodie pour les multiples voyages à l'étranger. Ces voyages ont toujours été un réel plaisir. J'ai une chance incroyable d'avoir pu partager ces moments avec vous. Je remercie également Marc et Corinne pour leurs traditionnels brunchs. Nos discussions sur les voyages, l'apprentissage de la langue anglaise et la culture anglo-saxonne m'ont passionné.

Je remercie également Jean-François, Brigitte, Pauline et Thomas pour leurs soutiens et encouragements durant toute la période de ma thèse et celle de Claire.

Je n'aurais jamais atteint un tel niveau d'études sans l'aide mes parents, Patrick et Nicole. J'espère que vous êtes fiers de moi par cette présente thèse. Je ne vous remercierai jamais assez pour toute l'aide que vous m'avez apportée durant toutes ces années. Vous m'avez laissé la liberté d'étudier ce que je souhaitais. Vous m'avez tellement apporté. Vous avez été présents quand Claire et moi devions venir sur Amiens.

Je remercie également ma sœur, Laëtitia, et sa petite famille, Bertrand, Dorian et Nicolas. Vous nous avez toujours accueillis chez vous et les soirées de jeux de société ont des bouffés d'airs frais durant tout ce travail. Merci Laëtitia et Bertrand de m'avoir aidé également durant mes études. Vous m'avez beaucoup inspiré et vous m'avez donné le goût de la science.

Tous mes remerciements vont à ma tendre moitié, Claire. Tu es le pilier de ce travail. Je n'aurais jamais pu réussir ma thèse sans ton aide, ton soutien, ta patience et ta compréhension. Ton courage et ta force ont été mes inspirations pour tenir tout au long de ce travail. Nous sommes tous les deux passionnés par ce que nous faisons. Ce travail de thèse m'a rendu parfois grognon et anxieux. Je n'ai pas forcément été facile à vivre durant cette période. Pourtant, tu as toujours été là pour moi. Cette aventure a commencé en t'accompagnant dans ta propre aventure, ta propre thèse. Tu m'as profondément changé. Tu me rends chaque jour meilleur.

Durant la rédaction de ce manuscrit, la musique m'a accompagné et a rythmé mes séances d'écriture. J'en profite pour en citer quelques unes : *La 9e symphonie du "Nouveau Monde"* par Antonín Dvorák, *The Hobbit: An Unexpected Journey*, *The Lord of the Rings: The Fellowship of the Ring* et *The Hobbit - The Desolation of Smaug* par Howard Shore, *Essentiel* par Ludovico Einaudi, *The Fountain* par Clint Mansell, *Rogue One: A Star Wars Story* par Michael Giacchino, *Home Alone* par Totorro, *Dial 'M' for Monkey* par Bonobo.

## **SOMMAIRE**

|   |     |
|---|-----|
| Introduction-----   | 13  |
| 1. Le haut potentiel intellectuel -----   | 17  |
| 1.1. Du haut potentiel au haut potentiel intellectuel-----  | 18  |
| 1.1.1. Modèles théoriques du haut potentiel-----  | 18  |
| 1.1.1.1. Modèle triarchique de l'intelligence -----   | 19  |
| 1.1.1.2. Modèle des trois anneaux -----   | 23  |
| 1.1.1.3. Modèle différenciateur de la douance et du talent -----  | 26  |
| 1.1.2. Le haut potentiel intellectuel : un cas particulier-----   | 32  |
| 1.2. Le haut potentiel intellectuel en lien avec une conception psychométrique de<br>l'intelligence-----                | 34  |
| 1.3. Caractéristiques cognitives du haut potentiel intellectuel -----   | 38  |
| 1.4. La question de l'identification du haut potentiel intellectuel-----  | 44  |
| ARTICLE 1 - Short Forms of Wechsler Scales Assessing the Intellectually Gifted Children<br>Using Simulation Data-----   | 53  |
| 2. Les capacités attentionnelles -----  | 91  |
| 2.1. Les réseaux attentionnels -----  | 93  |
| 2.1.1. Le réseau d'alerte-----  | 94  |
| 2.1.2. Le réseau d'orientation-----   | 97  |
| 2.1.3. Le réseau du contrôle exécutif-----  | 100 |
| 2.2. Évaluation des réseaux attentionnels : Attention Networks Test-----  | 105 |
| 2.3. Le développement des réseaux attentionnels -----   | 112 |
| 2.4. Lien entre les réseaux attentionnels et le haut potentiel intellectuel-----  | 114 |
| ARTICLE 2 - Development of attentional networks in intellectually gifted children -----                                 | 116 |
| 3. La capacité de la mémoire de travail-----  | 150 |
| 3.1. Conceptions théoriques-----  | 152 |
| 3.1.1. Modèle des composants multiples -----  | 153 |
| 3.1.2. Modèle des processus intégrés -----  | 157 |
| 3.1.3. Modèle de partage temporel des ressources -----  | 160 |
| ARTICLE 3 - Mesurer le développement de la mémoire de travail : Exemple d'une tâche<br>d'empan complexe adaptative----- | 164 |
| 3.2. La capacité de mémoire de travail, l'intelligence et le haut potentiel intellectuel----                            | 197 |



|   |     |
|---|-----|
| ARTICLE 4 - Explaining the high working memory capacity of gifted children: |     |
| Contributions of processing skills and executive control-----               | 201 |
| Discussion générale-----  | 239 |
| Conclusion -----  | 248 |
| Références bibliographiques-----  | 252 |

## INTRODUCTION

Dans les médias, de nombreuses émissions sont consacrées à ces enfants ayant des performances hors normes. Les livres pour le grand public se succèdent pour sensibiliser et montrer les spécificités de ces enfants à haut potentiel. Ces enfants interrogent et questionnent sur la manière d’appréhender la manifestation du potentiel humain et sur son interaction avec son environnement physique et social. En France, la question du haut potentiel a été sujette à un long désintérêt. Une idée reçue s’était enracinée disant qu’un haut potentiel était synonyme d’une réussite inéluctable dans tous les domaines. Bien que la majorité des enfants à haut potentiel n’ont aucun problème à s’adapter et à réussir au sein de leur environnement, certains d’entre eux peuvent éprouver des difficultés, vivre des échecs successifs et subir de l’incompréhension vis-à-vis de leurs pairs et des adultes face à leurs difficultés. Après le rapport ministériel de Delaubier (2002), le Ministère de l’Éducation Nationale considère ces enfants hors normes comme des élèves ayant des besoins particuliers. Par conséquent, la réussite dans certains domaines et l’échec dans d’autres peuvent être considérés comme les deux faces d’une même pièce, c’est-à-dire le haut potentiel. Depuis quelques années, de nombreux articles scientifiques se sont intéressés aux mythes et aux réalités de ces enfants à haut potentiel dans des revues nationales et internationales comme la revue *Psychologie Française* (par ex. Lautrey, 2004), la revue *Gifted Child Quarterly* (par ex. Treffinger, 2009), la revue *High Ability Studies* (par ex. Ziegler & Raul, 2010), ou encore la revue *Current Directions in Psychological Science* (par ex. Winner, 2000). Cet intérêt grandissant a pour but de mieux comprendre les contradictions que peut parfois présenter le haut potentiel. Cet objectif est animé par la volonté de faciliter le plus possible la manifestation de ce haut potentiel au regard du bien-être de l’enfant.

Le terme de hauts potentiels doit être mis au pluriel. Il existe autant de hauts potentiels qu'il y a de domaines où il peut se manifester. Parmi ces différentes manifestations, une attention particulière est portée sur le haut potentiel intellectuel en France (Delaubier, 2002). En effet, ce type de haut potentiel est plus facilement identifiable grâce aux tests classiques de l'intelligence, et, contre toute attente, certains enfants à haut potentiel intellectuel peuvent être en échec scolaire et/ou avoir des difficultés d'intégration sociale. Ce paradoxe montre les limites de nos connaissances sur le fonctionnement intellectuel qui sont loin d'avoir percé toute la complexité de ses liens avec les performances scolaires.

Fort de ce constat, deux équipes de recherche en sciences psychologiques (Centre de Recherche en Psychologie : Cognition, Psychisme et Organisations – CRP-CPO, EA 7273) et en sciences de l'éducation (Centre Amiénois de Recherche en Éducation et Formation — CAREF, EA 4697) de l'Université de Picardie Jules Verne ont croisé leur expertise sur le haut potentiel intellectuel dans le cadre d'un projet régional structurant intitulé « Enfants et adolescents à haut potentiel : identification et scolarisation » (HPISCOL), et financé par les Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) et le Conseil Régional des Hauts-de-France. Ce projet de recherche avait 3 objectifs. Le premier objectif était d'explorer les spécificités cognitives de cette population atypique afin d'aider à améliorer leur identification. Le second objectif était d'étudier le fonctionnement psychique, l'estime de soi et la construction identitaire de ces enfants à haut potentiel intellectuel, en prenant en compte les effets du contexte scolaire. Le troisième et dernier objectif concernait l'étude des pratiques éducatives afin de les adapter à leurs spécificités. Ce travail de thèse, soutenu financièrement par les FEDER et le Conseil Régional des Hauts-de-France, s'est inscrit dans le premier objectif du projet HPISCOL, c'est-à-dire apporter une contribution aux connaissances sur le fonctionnement et le développement cognitif des enfants à haut potentiel

intellectuel afin d'amener une réflexion sur l'identification des spécificités cognitives de ces enfants.

Ce travail de thèse comprend 3 parties qui sont chacune constituée d'une présentation théorique des concepts, et d'une ou deux études originales réalisées durant la thèse. Chaque recherche originale correspond à un article scientifique publié ou soumis pour publication. Après ces 3 parties, une discussion générale permettra de mettre en lien les découvertes réalisées durant ce travail de thèse avec celles issues de la littérature, concernant le fonctionnement et le développement cognitif et les méthodes de leur évaluation chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Enfin, ce présent manuscrit se terminera par une conclusion générale aboutissant sur les implications de cette thèse dans le domaine de la clinique, de la pédagogie et de la recherche.

La première partie de cette thèse débute par la présentation du haut potentiel intellectuel. Le but est de relater des connaissances sur les différentes conceptions actuelles du haut potentiel et du lien avec la conception de l'intelligence. Ensuite, une revue de la littérature présente les caractéristiques cognitives des enfants à haut potentiel intellectuel afin de mieux comprendre le profil cognitif de ces enfants à besoins particuliers. La question de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel est discutée et se poursuit par la présentation d'une première étude empirique concernant une méthode abrégée d'identification de ces enfants. Outre leur identification, l'objectif de cette méthode est d'apporter du temps supplémentaire aux cliniciens et aux chercheurs pour évaluer d'autres aptitudes cognitives pouvant être essentielles dans l'appréhension du haut potentiel intellectuel, comme les capacités attentionnelles et la capacité de la mémoire de travail.

La deuxième partie porte sur le développement des capacités attentionnelles des enfants à haut potentiel intellectuel. Ces aptitudes cognitives sont très importantes dans le développement des capacités intellectuelles et mnésiques de l'individu. Elles jouent également un rôle important dans les performances scolaires chez les enfants et les adolescents. Malgré une littérature abondante sur le lien entre les capacités attentionnelles et l'intelligence, peu d'études se sont intéressées au développement de ces capacités cognitives chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Pour combler ce manque, une étude empirique a donc été réalisée. Cette étude a permis d'observer certaines particularités attentionnelles chez ces enfants. D'après la littérature, ces résultats peuvent être en lien avec leur capacité de la mémoire de travail, fortement liée aux capacités intellectuelles et aux performances scolaires.

La troisième et dernière partie aborde donc la capacité de la mémoire de travail chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Cette partie commence par une présentation des différents modèles actuels de la mémoire de travail. Par le biais d'une première étude empirique, une réflexion est portée sur des préoccupations psychométriques concernant l'évaluation de la mémoire de travail dans les études développementales en général, et dans les études sur le haut potentiel intellectuel en particulier. Ensuite, une revue de la littérature a mis en évidence le rôle crucial de la mémoire de travail dans le fonctionnement intellectuel de l'individu. Cependant, peu d'études se sont intéressées au fonctionnement de cette mémoire de travail chez ces enfants au développement cognitif particulier. À partir d'une méthode d'évaluation spécifique, une deuxième étude empirique s'est focalisée sur les facteurs explicatifs du fonctionnement de la mémoire de travail chez les enfants à haut potentiel intellectuel.

## **1. LE HAUT POTENTIEL INTELLECTUEL**

Le haut potentiel est un vaste domaine où les synonymes se multiplient pour décrire une population particulière. En effet, il n'existe pas de consensus sur une définition claire et précise de ces enfants, adolescents ou adultes particuliers. Par conséquent, une multitude de termes sont employés pour décrire cette population spécifique. En France, l'Éducation Nationale décrit les élèves ayant un haut potentiel en juxtaposant le qualificatif de « précoce » (Delaubier, 2002). Ce terme de « précoce » semble sous-entendre une avance temporelle dans un ou plusieurs traits ou aptitudes qu'un enfant peut avoir par rapport à ses pairs. À l'âge adulte, le terme de « précocité » perd tout son sens. Or, les enfants à haut potentiel deviendront inéluctablement des adultes à haut potentiel (Rinn & Bishop, 2015). Dans la littérature internationale, le terme de douance (i.e. *giftedness*) est souvent utilisé pour décrire ces individus aux caractéristiques cognitives et non cognitives atypiques (McClain & Pfeiffer, 2012). Majoritairement, ces auteurs les qualifient de « *doués* » (c.-à-d. *gifted children* ou *gifted adults*). Cet adjectif qualificatif définit l'individu comme ayant « une aptitude innée au-dessus de la moyenne » selon le Trésor de la Langue Française informatisée (TLFi ; Bernard, 2010). Or, l'identification des traits ou aptitudes chez l'enfant, l'adolescent ou encore l'adulte est habituellement réalisée à partir des manifestations comportementales spécifiques comme le raisonnement analogique, la créativité ou les capacités analytiques en mathématiques (Renzulli, 2012). Par conséquent, le terme de *potentiel* serait plus adéquat à la réalité de leur identification, c'est-à-dire l'identification d'un « ensemble des ressources que possède en puissance un individu » (TLFi ; Bernard, 2010). Les individus à haut potentiel seraient ainsi qualifiés grâce à la manifestation de leurs capacités d'un niveau élevé et peu commun dans un ou plusieurs domaines spécifiques. Dans le cadre de l'identification du haut

potentiel, tous les tests d'aptitudes utilisés ont pour objectif d'évaluer « un potentiel d'acquisition de connaissances ou de compétences dans divers domaines » (American Psychological Association, 2015). Les objectifs de ce travail de thèse sont d'identifier et de mieux comprendre les spécificités développementales des enfants ayant un haut potentiel intellectuel.

### **1.1. Du haut potentiel au haut potentiel intellectuel**

Dans la littérature, de nombreux modèles théoriques tentent de définir le haut potentiel. Chaque modèle théorique décrit les caractéristiques perçues comme inhérentes aux enfants à haut potentiel (Sternberg & Davidson, 2005). Ces modèles théoriques montrent qu'il existe plusieurs types de haut potentiel, et elles permettent d'identifier leurs besoins. Cependant, aucune de ces différentes conceptions du haut potentiel ne fait consensus. Tous ces modèles théoriques s'accordent tout de même sur l'idée que le haut potentiel est un construit ayant une multitude de facettes.

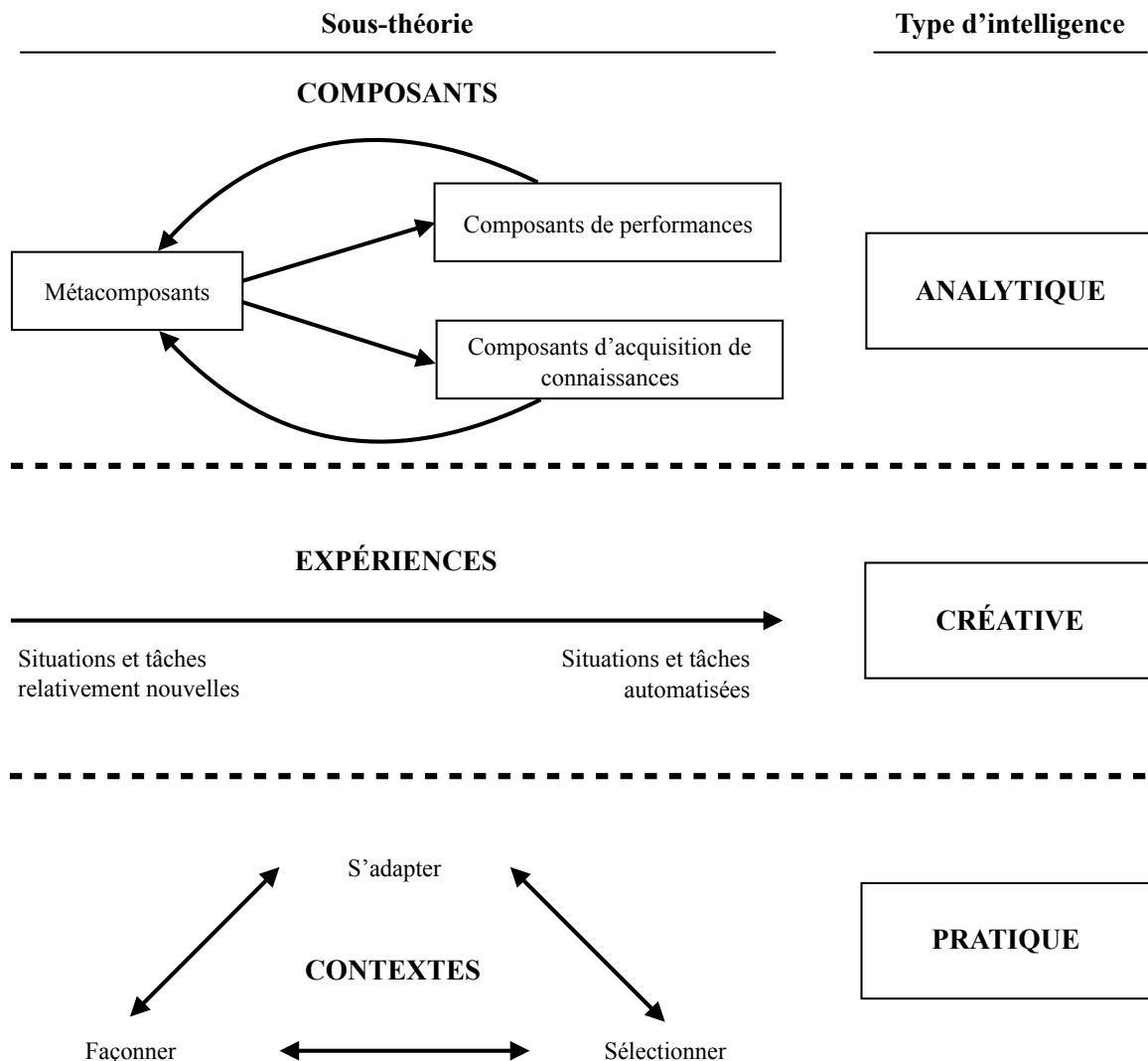
#### **1.1.1. Modèles théoriques du haut potentiel**

Tous les modèles théoriques du haut potentiel prennent en compte l'intelligence. Les capacités intellectuelles sont considérées comme un composant important du haut potentiel (Thompson & Oehlert, 2010). Cependant, tous les auteurs s'accordent pour considérer que le haut potentiel n'est pas le simple synonyme d'un QI élevé (Warne, 2015). En effet, le haut potentiel peut s'exprimer dans de nombreux domaines liés à des activités humaines. La manifestation du haut potentiel serait tributaire d'un développement. Ces différents modèles théoriques divergent sur plusieurs niveaux : 1) le nombre de domaines généraux et spécifiques où le haut potentiel peut se manifester, 2) les facteurs personnels et

environnementaux impliqués dans le développement du haut potentiel et 3) la distinction entre le haut potentiel et le talent.

**1.1.1.1. Modèle triarchique de l'intelligence**

Le modèle triarchique de l'intelligence fait l'hypothèse de l'existence de 3 aspects différents de l'intelligence (Sternberg, 1999). La Figure 1 présente une synthèse du fonctionnement de ces 3 aspects d'après le modèle triarchique de l'intelligence. Ces 3 types d'intelligence supposés sont basés sur 3 aspects liés aux traitements de l'information à partir de facteurs personnels et environnementaux de l'individu.



**Figure 1 : Structure du modèle triarchique de l'intelligence. Adaptation du schéma issu de Sternberg & Grigorenko (2002).**



L'intelligence analytique est un aspect cognitif de l'intelligence, c'est-à-dire une intelligence permettant de traiter les informations issues de l'environnement. Cet aspect de l'intelligence correspond à l'émanation d'un travail en synergie de 3 types de composants distincts : 1) les métacomposants (*metacomponents*, en anglais) qui correspondent aux processus exécutifs, c'est-à-dire aux processus liés à la planification, au contrôle et à la régulation des actions et des cognitions. Ces métacomposants permettent à l'individu de reconnaître et de définir la nature du problème à résoudre. Elles se chargent également d'allouer les ressources nécessaires pour la résolution du problème et d'évaluer l'adéquation de la solution trouvée. Les métacomposants sont fortement assimilables aux capacités métacognitives de l'individu déployées lors de la résolution de problème, c'est-à-dire à la perception de ses propres processus cognitifs qui requiert l'évaluation, la supervision ou le contrôle de ces activités cognitives ; 2) les composants de performance (*performance components*, en anglais) qui permettent le déploiement des processus cognitifs afin d'exécuter les instructions issues des métacomposants ; 3) les composants d'acquisition des connaissances (*knowledge-acquisition components*, en anglais) qui aident à la sélection des informations à encoder et/ou à utiliser dans un contexte donné. En somme, l'aspect analytique de l'intelligence correspond à la capacité d'analyser, d'évaluer et de comparer des informations dans l'objectif de résoudre des problèmes typiquement abstraits et scolaires (Sternberg, Castejón, Prieto, Hautamäki, & Grigorenko, 2001). L'intelligence analytique est principalement évaluée par les tests classiques de l'intelligence, tels que les échelles de Wechsler. Par conséquent, les capacités analytiques sont fortement liées au facteur général de l'intelligence (*g* ; Sternberg, 2003).

L'intelligence créative est un aspect expérientiel de l'intelligence qui correspond à la manifestation d'un comportement intelligent lors d'activités relativement nouvelles. Par la

suite, ces activités peuvent devenir automatisées, nécessitant de moins en moins d'effort au niveau des traitements, tels que la lecture, l'écriture ou la conduite. L'aspect créatif de l'intelligence correspondrait à la capacité de créer, d'inventer ou d'imaginer des solutions originales et adaptées aux problèmes non familiers et relativement nouveaux (Sternberg et al., 2001). À la différence des capacités analytiques, les capacités créatives ne sont pas évaluées dans les tests classiques de l'intelligence. La créativité correspond à la capacité de générer des idées nouvelles, originales et adéquates à la situation. Dans la littérature, les capacités créatives sont habituellement mesurées par des tests standardisés spécifiques, tels que le test *Torrance Test of Creative Thinking* (Torrance, 1974) ou encore le test d'Évaluation du Potentiel Créatif (EPoC ; Lubart, Besançon, & Barbot, 2011).

L'intelligence pratique est un aspect contextuel de l'intelligence qui attesterait d'un comportement intelligent en lien avec l'adaptation, le façonnage et la sélection d'informations issues de l'environnement. L'aspect pratique de l'intelligence correspond à la capacité d'utiliser et d'appliquer ses connaissances acquises dans des situations spécifiques et concrètes (Sternberg et al., 2001). Les connaissances tacites ont un rôle central dans le fonctionnement de l'intelligence pratique (Sternberg, Wagner, Williams, & Horvath, 1995). Ce type de connaissances peut être défini comme les savoir-faire acquis au travers de l'expérience (Lejeune, 2011). Ces connaissances tacites sont des savoirs contextualisés permettant à l'individu de résoudre des problèmes pratiques. Elles ne peuvent donc pas être explicitement enseignées, car ces connaissances peuvent être difficilement expliquées verbalement. L'intelligence pratique est évaluée à partir de résolution de problèmes concrets et spécifiques à un travail en particulier ou à une activité de tous les jours.

Selon Sternberg (1999), le concept d'intelligence se définit comme le traitement de l'information (c.-à-d. l'aspect cognitif), afin de réaliser des tâches relativement nouvelles, ou d'automatiser les traitements liés à certaines tâches (c.-à-d. l'aspect expérientiel) dans le but de s'adapter, de modifier, et de sélectionner les informations de l'environnement (c.-à-d. l'aspect contextuel). Ces différents aspects de l'intelligence sont interreliés afin de réussir les différents buts définis par l'individu au sein d'un contexte socioculturel (Sternberg, 1999). D'après le modèle trirachique de l'intelligence, la difficulté d'adaptation de l'individu à son environnement ne serait pas liée uniquement aux aptitudes cognitives évaluées par les tests classiques de l'intelligence. La capacité d'adaptation serait associée à des mécanismes sous-jacents à l'application de processus spécifiques et nécessaires aux traitements de l'information issues de l'environnement. Dans le modèle triarchique de l'intelligence, le traitement de l'information joue donc un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'intelligence humaine (Sternberg, 1999).

Au regard du modèle triarchique de l'intelligence, le haut potentiel correspondrait donc au développement de l'expertise associé à des performances élevées et rares dans un ou plusieurs aspects de l'intelligence. Par conséquent, ce modèle théorique conçoit 4 types de haut potentiel (Sternberg & Grigorenko, 2002) : 1) le haut potentiel au niveau analytique correspondrait au haut potentiel intellectuel, c'est-à-dire aux individus ayant un QI très élevé. Ces individus à haut potentiel analytique seraient extrêmement performants dans l'analyse, le jugement, la critique, la comparaison d'informations impliquées dans la résolution de problèmes abstraits, et plus particulièrement dans le domaine scolaire ; 2) le haut potentiel au niveau créatif correspondrait à des individus ayant de très fortes capacités à générer des idées nouvelles, originales et adaptées aux situations rencontrées ; 3) le haut potentiel au niveau pratique serait une aptitude extrêmement élevée à utiliser, à appliquer, à mettre en pratique

des connaissances acquises par l'expérience dans l'objectif de résoudre un problème spécifique et concret ; 4) le haut potentiel équilibré correspondrait aux individus très performants dans les 3 aspects de l'intelligence (analytique, créatif et pratique). L'individu avec un haut potentiel équilibré serait capable d'adapter l'utilisation de ses connaissances en maîtrisant le moment et la manière appropriés pour utiliser ces 3 aspects de l'intelligence.

En résumé, l'intelligence d'un individu ne se résumerait pas aux performances à un test classique de l'intelligence, dont le QI serait l'indicateur du potentiel intellectuel général de l'individu. Selon le modèle triarchique de l'intelligence, il existerait 3 types d'intelligence : l'intelligence analytique, créative et pratique. Le haut potentiel serait la manifestation de performances importantes et peu communes dans au moins un des 3 aspects de l'intelligence ou encore la coordination de tous ces aspects intellectuels. Ce modèle théorique met également en évidence l'importance de facteurs personnels et environnementaux dans la manifestation de comportements intelligents en général, et du haut potentiel en particulier.

#### **1.1.1.2. Modèle des trois anneaux**

Le modèle des 3 anneaux proposé par Renzulli (1978) est l'un des modèles les plus populaires dans le monde des enseignants, en particulier dans les pays anglosaxons (McClain & Pfeiffer, 2012). Après une rapide recherche dans la base de donnée *Google Scholar*, l'article princeps présentant le modèle des 3 anneaux (Renzulli, 1978) a été cité 2195 fois à ce jour. Ce modèle théorique influant part du constat que l'intelligence n'est pas un concept unitaire (Sternberg, 1999). Considéré comme un indicateur du facteur g de l'intelligence, le QI est jugé comme une appréciation limitée et restrictive du potentiel de l'individu. Fort de ce constat, le modèle des 3 anneaux définit 2 types de haut potentiel (Renzulli, 1978 ; 2006) : 1) le haut potentiel scolaire et 2) le haut potentiel créatif-productif. Bien que ces 2 types de

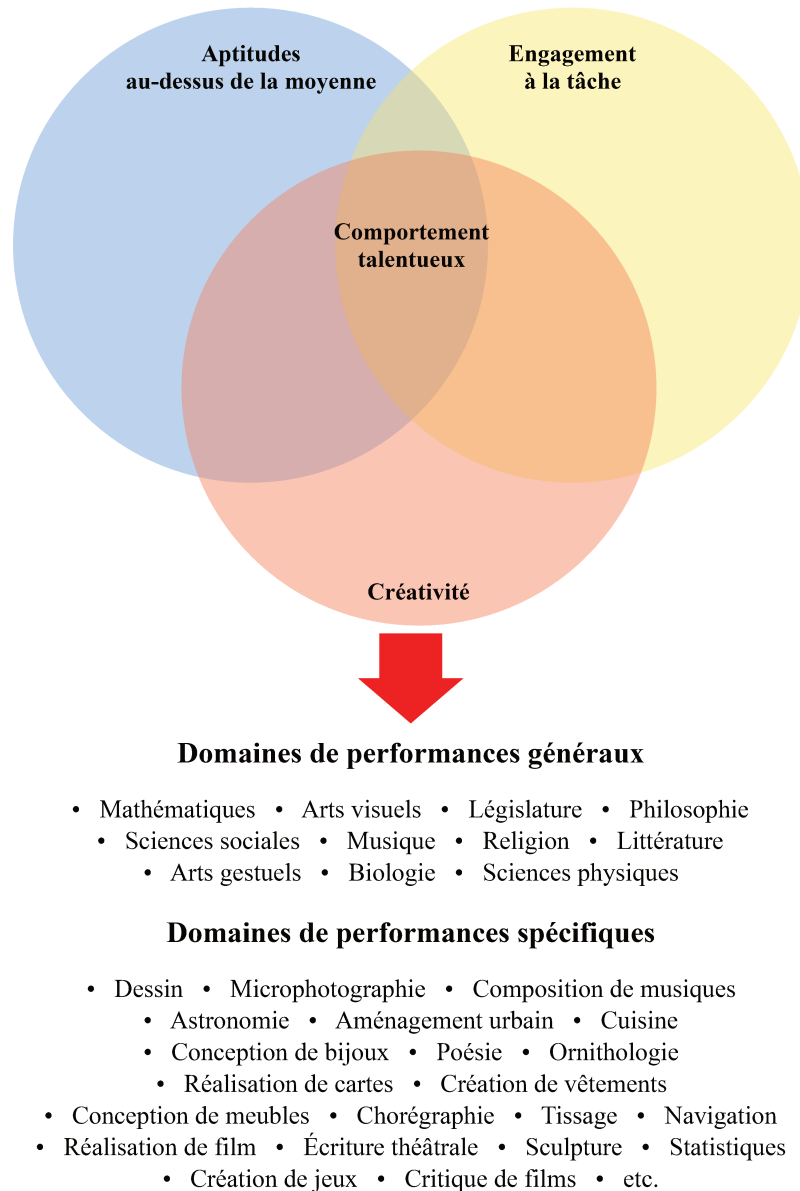
haut potentiel peuvent interagir, leur distinction est nécessaire afin d'être capable de développer leur comportement talentueux dans des domaines d'activités générales, tels que les mathématiques ou la littérature, et spécifiques comme les statistiques ou la poésie (Renzulli, 2006).

Le premier type de haut potentiel est décrit comme « scolaire ». Il correspond aux individus ayant des performances supérieures à la norme à des tests standardisés d'aptitudes cognitives. La plupart de ces élèves auraient des notes scolaires élevées facilitant leur réussite scolaire. Cependant, le lien entre le potentiel intellectuel et la réussite scolaire est loin d'être parfait (Aubry & Bourdin, 2016 ; Warne, 2015). Le QI est un facteur déterminant, mais pas suffisant pour expliquer toute la complexité de la réussite scolaire (Guez, Panaïotis, Peyre, & Ramus, 2018). D'après ce modèle, le haut potentiel scolaire est basé sur des mécanismes de raisonnement déductif et abstrait. Le développement de ces mécanismes est structuré, permettant ainsi d'acquérir, de stocker et de récupérer des informations (Renzulli, 2006).

Le deuxième type de haut potentiel est nommé « créatif-productif ». Il représente les capacités de l'individu à créer des idées et des travaux originaux, qui doivent le transcender. Selon Renzulli (2005), la créativité est l'élaboration de productions originales ayant un réel impact sur la vision du monde de l'individu lui-même, et des autres. Le haut potentiel créatif-productif est basé sur des mécanismes de raisonnement inductif et contextualisé. Ces mécanismes mettent à disposition le potentiel créatif de l'individu pour réaliser des productions (par ex. des idées, des œuvres, des programmes informatiques, etc.) dans un contexte qui lui fait sens.

L'identification de ces 2 types de haut potentiel met évidence la capacité de l'individu d'être talentueux. Cependant, le comportement talentueux ne peut se manifester qu'à

l'intersection de l'apparition de 3 catégories de traits (Renzulli, 1978 ; 2005 ; 2006) : la présence d'aptitudes cognitives au-dessus de la moyenne, d'un niveau élevé d'engagement durant la tâche et d'un niveau élevé de créativité (Renzulli, 1978). Ces 3 catégories de traits caractéristiques permettent ainsi le développement du comportement talentueux dans des domaines de performances généraux et/ou spécifiques (voir Figure 2).



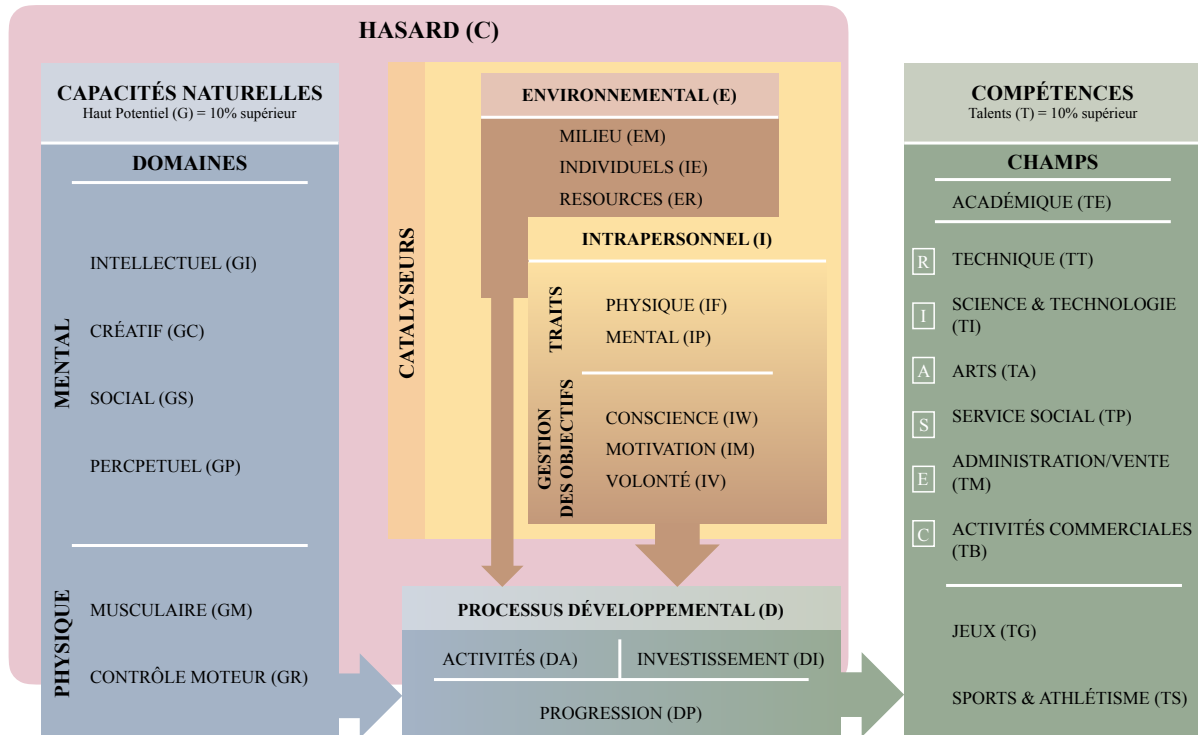
**Figure 2. Le modèle des trois anneaux. Adaptation de la représentation graphique de Renzulli (1978).**

En résumé, les hauts potentiels scolaire et créatif-productif permettent de faciliter la manifestation de comportements talentueux. L'expression de ce type de comportement n'est pas limité par un traditionnel seuil indiquant la rareté des capacités intellectuelles de l'individu ; il serait le fruit de l'association avec d'autres composants comme la créativité et l'engagement envers la tâche en cours. L'objectif du modèle des 3 anneaux est de comprendre l'apparition du comportement talentueux et d'élaborer des interventions éducatives adaptées de façon à développer ce type de comportement, en particulier, chez les enfants à haut potentiel et, en général, chez tous les enfants (Renzuelli, 2006).

### **1.1.1.3. Modèle différenciateur de la douance et du talent**

Le modèle différenciateur de la douance et du talent (*Differentiated Model of Giftedness and Talent*, en anglais) se différencie des 2 autres modèles théoriques par la distinction claire et précise du haut potentiel (ou de la douance ; *giftedness* en anglais) et du talent (Gagné, 1985 ; 2004 ; 2005 ; 2010). Cette distinction peut être assimilée à la différence entre les potentialités de l'individu liées à ses capacités naturelles dans certains domaines et les talents de l'individu comme ses compétences acquises dans des champs d'activité. Les potentialités peuvent être estimées à partir des tests standardisés (Gagné, 1985). Elles sont nécessaires à l'émergence de performances dans les divers champs d'activité. Autrement dit, ces capacités naturelles peuvent évoluer en des compétences dans divers champs d'activité grâce à des processus développementaux (Gagné, 1985 ; 2004 ; 2005 ; 2010). L'objectif du modèle différenciateur de la douance et du talent est de conceptualiser le lien entre le haut potentiel dans un ou plusieurs domaines et les talents manifestés dans un ou plusieurs champs d'activité. Ce lien serait dû à l'implication de processus développementaux modulés par des facteurs personnels et environnementaux. Ainsi, le modèle différenciateur de la douance et du

talent met en évidence 5 composants fondamentaux (voir Figure 3) : les dons ou les hauts potentiels (*Gifts* en anglais), les talents, les catalyseurs intrapersonnels, les catalyseurs environnementaux et les processus développementaux.



**Figure 3. Le modèle différenciateur de la douance et du talent. Adaptation de la représentation graphique de Gagné (2010).**

Les hauts potentiels (ou les dons ; *Gifts* en anglais) sont des capacités naturelles et remarquables dans un ou plusieurs domaines. Ces domaines peuvent être organisés en 2 catégories : 1) les capacités mentales qui incluent les domaines intellectuels, créatifs, sociaux, perceptuels, et 2) les capacités physiques qui comprennent les domaines de la force musculaire et du contrôle moteur. Ces capacités naturelles sont estimées à partir de l'observation de phénotypes comportementaux par des tests standardisés ; par exemple, les capacités intellectuelles peuvent être appréciées avec des tests d'intelligence, tels que les échelles de Wechsler. Ces capacités doivent également être d'un niveau élevé et peu commun, c'est-à-dire qu'elles doivent se situer au 90e centile de la population générale appariée en âge



chronologique (Gagné, 1998 ; 2010). Autrement dit, l'individu doit avoir des capacités naturelles dans au moins un domaine où moins de 10 % de ses pairs en âge chronologique auraient une telle performance. Ces capacités sont dites naturelles, mais elles ne sont pas innées. En effet, elles n'apparaissent pas dès la naissance. Elles se développent à partir d'un soubassement biologique, et elles sont influencées par des facteurs génétiques et environnementaux. Par exemple, les capacités intellectuelles se développent selon l'âge (Deary et al., 2012 ; Gow et al., 2011) et elles sont déterminées par des facteurs génétiques (Bartels, Rietveld, Van Baal, & Boomsma, 2002 ; Bates, Hansell, Martin, & Wright, 2016 ; Deary, Spinath, & Bates, 2006) et environnementaux, tels que la scolarisation (voir Ritchie & Tucker-Drob, 2018 pour une méta-analyse).

Les talents correspondent à la transformation des capacités naturelles en des compétences acquises dans un champ d'activité particulier. Ces compétences sont ainsi la conséquence d'un apprentissage systématique et dépendant d'un champ d'activité. L'individu talentueux doit maîtriser les compétences d'au moins un champ d'activité au 90e centile de la population du même âge, active ou ayant été active dans ce champ d'activité (Gagné, 1998 ; 2010). Le modèle différenciateur de la douance et du talent dénombre 9 champs d'activités où l'individu peut développer son talent. Pour les définir, Gagné (1985, 2010) décrit 6 champs d'activités basés sur le système RIASEC de John Holland. Ce système représente 6 catégories de compétences liées aux carrières et aux choix professionnels que l'individu peut acquérir : Réaliste, Investigateur, Artistique, Social, Entrepreneur, et Conventionnel. En plus de ces 6 champs d'activité, le modèle en comprend 3 autres : le champ scolaire, celui des jeux, et celui des sports.

Les processus développementaux sont des processus dynamiques et essentiels dans la transformation des capacités naturelles en compétences au sein d'un champ d'activité. Selon le modèle différenciateur de la douance et du talent, cette transformation est tributaire de la participation active et continue de l'individu à un programme d'activité, afin de maîtriser des compétences à un niveau élevé et peu commun (soit supérieur au 90<sup>e</sup> centile de la population du même âge, active ou ayant été active dans ce champ d'activité). Le modèle différenciateur de la douance et du talent distingue 3 processus développementaux : 1) les activités telles que les programmes d'activités structurés (par ex. l'école, le conservatoire, les clubs sportifs, etc.) ou l'apprentissage autodidacte dans un champ d'activité spécifique ; 2) l'investissement en termes de temps, d'argent ou d'énergie ; 3) les progrès réalisés en prenant en compte la vitesse d'apprentissage et le degré d'expertise. L'investissement en énergie serait l'un des processus les plus importants dans cette transformation de capacités naturelles en compétences (Gagné, 2018). En effet, l'énergie investie dans l'activité fait écho aux processus cognitifs d'attention focalisée et de concentration qui sont cruciales dans les apprentissages (voir à la section 2).

Les catalyseurs, intrapersonnels et environnementaux, peuvent moduler l'effet des processus développementaux. Autrement dit, ces catalyseurs peuvent soit favoriser, soit freiner les processus développementaux. Les catalyseurs intrapersonnels correspondent aux caractéristiques personnelles de l'individu liées à ses traits physiques (par ex. ses handicaps, son état de santé générale, son apparence, etc.) et à ses traits mentaux (par ex. son tempérament, sa personnalité, sa capacité de résilience, etc.). Les traits de personnalité sont un premier sous-groupe de catalyseurs intrapersonnels. Ils jouent un rôle important dans les apprentissages scolaires, et plus particulièrement le trait de personnalité « ouverture » lié à la tendance à apprécier des idées peu communes, à être curieux, à avoir de l'imagination, et le

trait de personnalité « conscienciosité » lié à la tendance à avoir une autodiscipline, à être orienté vers des buts (Heaven & Ciarrochi, 2012). Un deuxième sous-groupe de catalyseurs intrapersonnels est dévolu aux processus de gestion des objectifs. Ces processus sont constitués de 3 dimensions : 1) la prise de conscience, et particulièrement de ses forces et de ses faiblesses ; 2) la motivation qui peut être définie comme l'identification de l'intérêt des buts à réaliser pour des raisons personnelles liées aux besoins, aux valeurs et aux passions de l'individu ; 3) la volition qui correspond à l'ambition de l'individu à réussir ses propres objectifs, en étant persévérant, déterminé, et capable de résilience. Ces catalyseurs intrapersonnels sont en interaction avec l'environnement de l'individu. Le modèle différenciateur de la douance et du talent identifie 3 dimensions de l'environnement jouant le rôle de catalyseur environnemental : 1) le milieu correspondant à l'influence de la dimension socioéconomique, c'est-à-dire les apports financiers, culturels et sociaux que l'environnement peut offrir à l'individu ; 2) la dimension psychologique liée aux différentes relations sociales que l'individu peut avoir avec des personnes ayant un impact sur sa manière de voir le monde (par ex. ses parents, ses enseignants, ses amis, sa fratrie, etc.) ; 3) la dimension éducative correspondant aux différentes ressources offertes à l'individu durant ses apprentissages. Par exemple, les enseignements enrichis ou, plus généralement, les programmes scolaires spécialisés peuvent apporter des ressources nécessaires et facilitant le développement de compétences dans un ou plusieurs champs d'activité.

Le modèle différenciateur de la douance et du talent souligne l'importance de l'influence du hasard dans l'apparition des capacités naturelles, sur les catalyseurs et sur les processus développementaux. Cette influence du hasard peut être positive ou négative sur les différents déterminants de l'apparition du haut potentiel et du talent. En effet, le hasard se manifeste dans la transmission de caractéristiques héréditaires ainsi que dans l'expression génétique

particulier. Cette manifestation a une ascendance forte sur l'apparition de haut potentiel et des facteurs intrapersonnels déterminant le déploiement des processus développementaux. De plus, le hasard est fondamental au niveau des catalyseurs environnementaux. En effet, l'enfant naît dans une famille ayant un niveau économique et socioculturel qui est totalement hors de son contrôle. Cela va avoir une influence sur le développement du haut potentiel et la transformation de ce dernier vers un talent. En somme, le hasard correspond à toutes les opportunités que la vie peut offrir à un enfant afin qu'il puisse développer un haut potentiel et le transformer en un talent.

En résumé, le modèle différenciateur de la douance et du talent insiste sur la distinction entre le haut potentiel et le talent. D'une part, le haut potentiel apparaît comme la manifestation de capacités mentales ou physiques naturellement développées et déterminées par des facteurs génétiques et environnementaux. Les domaines d'expression du haut potentiel sont multiples. Le haut potentiel peut donc avoir de multiples facettes. En d'autres termes, le haut potentiel ne se résumerait pas uniquement par la présence d'un niveau extrêmement élevé et peu commun des capacités intellectuelles. D'autre part, le talent est conceptualisé comme le résultat de la transformation des capacités naturelles élevées et peu communes en des compétences élevées et peu communes, acquises dans un ou plusieurs champs d'activité spécifiques. Cette distinction entre les 2 concepts (c.-à-d. le haut potentiel *versus* le talent) permet de mieux appréhender les raisons éventuelles de la sous-performance de certains enfants à haut potentiel. En effet, ce modèle théorique postule l'existence de facteurs intrapersonnels et environnementaux qui sont déterminants dans le développement du haut potentiel et dans le déploiement des processus développementaux responsables de la transformation du haut potentiel en talent.

### **1.1.2. Le haut potentiel intellectuel : un cas particulier**

D'après les 3 modèles théoriques présentés précédemment, le haut potentiel intellectuel (Gagné, 1985 ; 2004 ; 2005 ; 2010 ; ou le haut potentiel analytique pour Sternberg, 1999 ; ou le haut potentiel scolaire pour Renzulli, 2005 ; 2006) correspondrait à l'une des facettes possibles du haut potentiel. Il serait caractérisé par des performances intellectuelles générales au-dessus de la norme à des tests standardisés (Gagné, 1985 ; 2004 ; 2005 ; 2010 ; Renzulli, 2006). Autrement dit, les enfants à haut potentiel intellectuel se caractérisent par une aptitude cognitive générale élevée et peu commune par rapport à une population du même âge chronologique. Le haut potentiel intellectuel est donc tributaire de la conception de l'intelligence.

L'intelligence est l'un des construits psychologiques les plus étudiés, où les résultats empiriques ont été les plus répliqués en psychologie (voir Warne, Astle, & Hill, 2018 pour une discussion). Cependant, il n'existe à ce jour aucune définition précise et consensuelle de l'intelligence (Schneider, Mayer, & Newman, 2016). Bien qu'insuffisante, la plupart des experts du domaine de l'intelligence la conçoit comme une aptitude générale liée au raisonnement et à la pensée abstraite (Gottfredson, 1997a ; Warne, 2015). La majorité des auteurs reconnaissent l'existence du facteur *g* de l'intelligence et de son utilité dans l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel (Renzulli, 2012 ; Sternberg, 2003 ; Gagné, 2010). Le facteur *g* de l'intelligence résulte de la matrice de corrélations positives (*positive manifold*, en anglais) entre les différentes aptitudes cognitives évaluées par des tests standardisés (Spearman, 1904). Cependant, certains auteurs ont vivement critiqué l'aspect réducteur du facteur *g* comme le représentant de l'intelligence humaine (Gardner, 1997 ; Sternberg, 2003).

Dans une perspective théorique radicale, la théorie des intelligences multiples (Gardner, 1997) s'inscrit dans le rejet du facteur *g* de l'intelligence en postulant l'existence de 8 formes d'intelligences indépendantes : 1) l'intelligence linguistique, 2) l'intelligence logicomathématique, 3) l'intelligence visuospatiale, 4) l'intelligence musicale, 5) l'intelligence kinesthésique, 6) l'intelligence naturaliste, 7) l'intelligence interpersonnelle et 8) l'intelligence intrapersonnelle. Cependant, aucune étude empirique ne semble avoir étayé l'hypothèse d'intelligences multiples et indépendantes (Lautrey, 2004 ; Sternberg & Grigorenko, 2002 ; Warne et al., 2018 ; Waterhouse, 2006). À l'inverse, les études empiriques ont démontré la présence systématique de corrélations positives entre les aptitudes cognitives avec de nombreuses batteries d'évaluation (Johnson, Bouchard, Krueger, McGue, & Gottesman, 2004 ; Johnson, Nijenhuis, & Bouchard, 2008 ; Lecerf & Canivez, 2018 ; Reynolds, Keith, Fine, Fisher, & Low, 2007). Cette constatation va à l'encontre de l'hypothèse d'une indépendance entre les différentes intelligences proposées par Gardner (1993). Par ailleurs, Sternberg (1993) a voulu démontré l'existence des 3 formes d'intelligence issues du modèle triarchique de l'intelligence (voir partie 1.1.1.1) à partir d'un outil standardisé : le Sternberg Triarchic Abilities Test (STAT ; Sternberg, 1993). Bien que Sternberg et collaborateurs (2001) ont insisté sur l'indépendance relative entre les 3 formes d'intelligence, plusieurs études ont montré que le modèle du facteur *g* expliquait mieux les résultats issus du STAT que le modèle triarchique de l'intelligence (Brody, 2003 ; Chooi, Long, & Thompson, 2014 ; Koke & Vernon, 2003).

Les tests d'intelligence standardisés peuvent tous être très différents, mais les études empiriques démontrent qu'ils mesurent tous le même type d'intelligence, c'est-à-dire une capacité mentale générale qui implique le raisonnement, la planification, la résolution de problèmes, la pensée abstraite, la compréhension et l'acquisition de connaissances

(Gottfredson, 1997a). Par conséquent, tous les tests classiques de l'intelligence sont tout à fait en mesure d'identifier les enfants à haut potentiel intellectuel. L'estimation de la capacité intellectuelle globale est essentielle, mais elle n'est pas suffisante pour comprendre la complexité du haut potentiel intellectuel. En effet, il est également important d'aller au-delà du facteur *g* de l'intelligence (Warne, 2015). Les différents tests psychométriques actuels s'appuient majoritairement sur un modèle hiérarchique des capacités cognitives, appelé le modèle de Carroll-Horn-Cattell (CHC ; voir Newton & McGrew, 2010 pour une revue). Ainsi, le modèle CHC est une modélisation de la structure de l'intelligence incontournable dans l'élaboration des tests d'intelligence (Grégoire, 2017). Il est donc nécessaire de présenter le modèle CHC et de le mettre en lien avec l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel.

### **1.2. Le haut potentiel intellectuel en lien avec une conception psychométrique de l'intelligence**

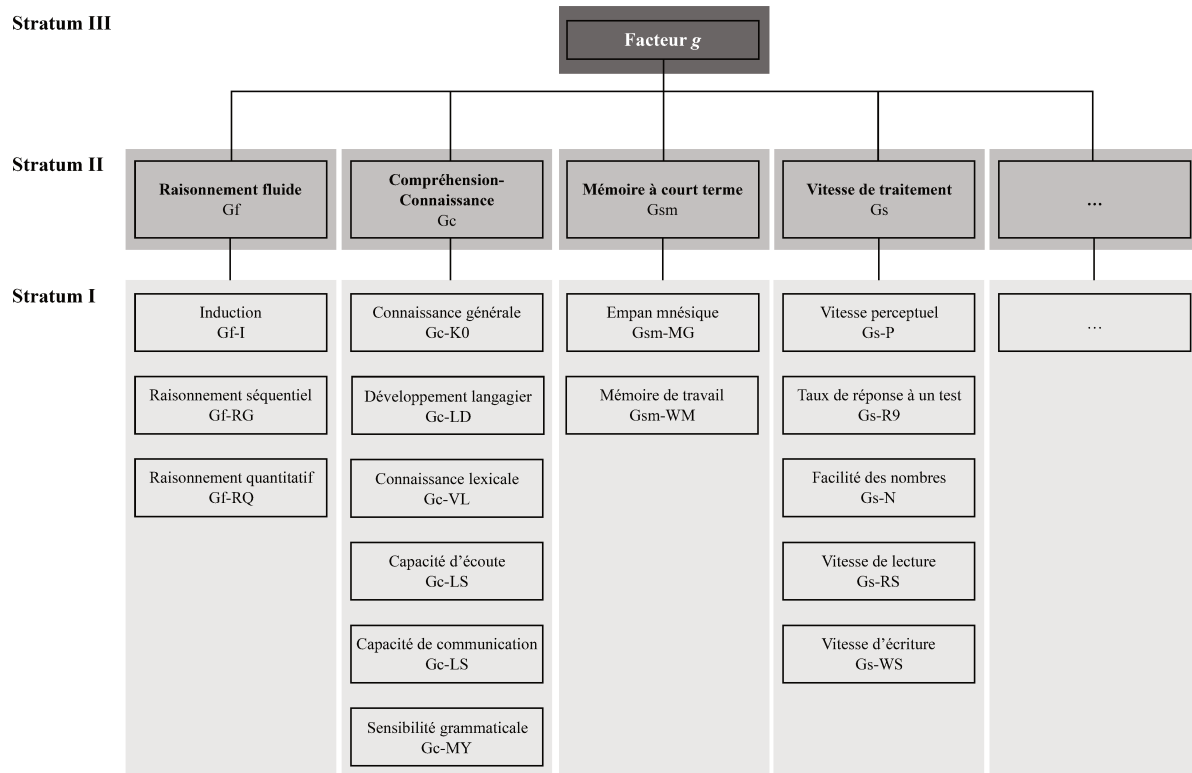
En psychométrie, la conception actuelle de l'intelligence associe l'idée du facteur *g* avec d'autres facteurs multidimensionnels de l'intelligence dans une relation hiérarchique (Carroll, 1993 ; Cattell, 1963 ; Horn & Cattell, 1966). Le facteur *g* serait l'apex d'une structure hiérarchique de nombreuses aptitudes cognitives. Cette idée d'organisation hiérarchique des capacités cognitives est devenue consensuelle dans les techniques de mesure des capacités intellectuelles (McGrew, 2009 ; Schneider, 2013 ; Warne, 2015). Cette conception structurale des aptitudes cognitives a permis de faire évoluer la notion d'intelligence d'un aspect unidimensionnel (c.-à-d. le facteur *g* de Spearman) vers une conception multidimensionnelle : le modèle CHC (Newton & McGrew, 2010 ; Schneider & McGrew, 2012).

Issu de l'analyse factorielle, le modèle CHC décrit 3 strates, liées aux degrés de généralité, ou d'abstraction, des aptitudes cognitives humaines évaluées par des épreuves standardisées

(voir Figure 4). Le niveau le plus général (Stratum III) correspond au facteur *g* de Spearman (1904). Le plus haut niveau de généralité des capacités intellectuelles, le facteur *g*, serait soit la cause de corrélations positives entre les différentes épreuves cognitives (Demetriou, Mouyi, & Spanoudis, 2008), soit le résultat de la coopération mutuelle des aptitudes cognitives impliquées dans ces différentes épreuves standardisées (Van Der Maas, Dolan, Grasman, Wicherts, Huizenga, & Raijmakers, 2006). Bien que sa nature reste toujours débattue, le facteur *g* est vu comme la source de variance partagée par toutes les épreuves d'une même batterie d'évaluation cognitive standardisée (Schneider, 2013). Le facteur *g* de l'intelligence est saturé par plusieurs aptitudes cognitives dites générales (*broad ability*, en anglais ; McGrew, 2009 ; Newton & McGrew, 2010 ; Schneider & Newman, 2015 ; Schneider, Mayer, & Newman, 2016). Actuellement, 16 aptitudes cognitives générales ont été répertoriées (Schneider & McGrew, 2012), et elles constituent le 2e niveau de généralité du modèle CHC (Stratum II). Parmi ces aptitudes cognitives générales, les aptitudes de raisonnement fluide (*Gf* ; anciennement intelligence fluide), de compréhension-connaissance (*Gc* ; anciennement intelligence cristallisée), de mémoire à court terme (*Gsm*) et de vitesse de traitement (*Gs*) sont les plus communément évaluées par les tests classiques de l'intelligence. En effet, ces aptitudes cognitives générales sont les plus saturées avec le facteur *g* de l'intelligence, et elles sont fortement impliquées dans les performances scolaires. Chaque aptitude cognitive générale est elle-même saturée par plusieurs aptitudes cognitives dites étroites (*narrow ability*, en anglais) ou spécifiques. À l'heure actuelle, le modèle CHC dénombre plus de 70 aptitudes cognitives spécifiques composant ainsi la troisième et dernière strate du modèle (Stratum I) (Schneider & McGrew, 2012). Ces aptitudes cognitives spécifiques se distinguent des aptitudes cognitives générales uniquement par leur degré de généralité. Par exemple, l'aptitude *Gf* fait intervenir des aptitudes cognitives plus spécifiques



comme l'induction (Gf-I), le raisonnement séquentiel général (Gf-RG) ou encore le raisonnement quantitatif (Gf-RQ) (Schneider & McGrew, 2012).



**Figure 4 : Représentation graphique partielle du modèle Cattell-Horn-Carroll (CHC ; Schneider & McGrew, 2012)**

Le modèle CHC propose donc une théorie structurelle des capacités cognitives. Cependant, il n'apporte aucune information sur le fonctionnement des relations structurales et hiérarchiques des aptitudes cognitives (Grégoire, 2017). Le modèle CHC postule ainsi que les aptitudes cognitives générales (Stratum II) saturent de manière équivalente le facteur *g* de l'intelligence (Stratum III). Or, les études empiriques montrent que certaines aptitudes cognitives globales ont une influence plus importante que d'autres sur le facteur *g* (Canivez, Watkins, & Dombrowski, 2016 ; Grégoire, 2017 ; Lecerf & Canivez, 2018 ; Rowe, Dandridge, Pawlusch, Thompson, & Ferrier, 2014 ; Weiss, Keith, Zhu, & Chen, 2013). Par exemple, les aptitudes Gf et Gc ont un rôle crucial dans le fonctionnement intellectuel. Ces

aptitudes cognitives ont habituellement une très forte saturation avec le facteur *g*. Par ailleurs, les différentes aptitudes cognitives globales n'ont pas la même puissance d'explication des performances scolaires (Aubry & Bourdin, 2016). Par exemple, l'aptitude *Gsm* aurait une influence plus importante que les autres aptitudes cognitives chez les enfants en général (Alloway & Alloway, 2010) et chez les enfants à haut potentiel intellectuel en particulier (Rowe, Kingsley, & Thompson, 2010). Le modèle CHC apporte un consensus au niveau de la taxonomie des aptitudes cognitives organisées de manière hiérarchique, mais le fonctionnement et le développement des relations entre ces différentes aptitudes cognitives restent inexpliqués par ce modèle.

Malgré ses faiblesses, le modèle CHC évolue et s'améliore à partir des travaux empiriques. La taxonomie des aptitudes cognitives générales et spécifiques peut changer à la lumière des découvertes de nouvelles aptitudes cognitives. Actuellement, quelques aptitudes cognitives générales sont en discussion pour être ajoutées à cette taxonomie (Schneider et al., 2016). Par exemple, plusieurs études empiriques ont apporté des arguments en faveur de l'intégration de l'intelligence émotionnelle dans le modèle CHC (MacCann, Joseph, Newman, & Roberts, 2014 ; Schneider et al., 2016 ; Stankov, 2017). Cette intelligence émotionnelle serait une forme d'intelligence sociale qui impliquerait « la capacité à contrôler ses propres sentiments et émotions ainsi que celles des autres pour les discriminer et les utiliser afin de guider ses propres actions et pensées » (Salovey & Mayer, 1990, p. 189). Ces nouvelles aptitudes cognitives générales permettent de compléter le profil des potentialités qu'un enfant peut avoir dans des domaines cognitifs, ou conatifs spécifiques comme l'intelligence émotionnelle (Brasseur & Grégoire, 2010). Le modèle CHC offre un cadre théorique important permettant d'investiguer les caractéristiques cognitives des enfants à haut potentiel intellectuel. L'exploration de leurs caractéristiques cognitives est essentielle afin de

faciliter leur identification et de mieux les accompagner tout au long de leur cursus scolaire et professionnel (Warne, 2015).

### **1.3. Caractéristiques cognitives du haut potentiel intellectuel**

Dans la littérature, les enfants à haut potentiel intellectuel présentent un profil cognitif spécifique par rapport aux enfants ayant un haut potentiel différent (Castejón, Gilar, Miñano, & González, 2016 ; Cho, Ahn, Han, & Park, 2008 ; Dixon, Cross, & Adams, 2001 ; Erwin & Worrell, 2011) et aux enfants n'ayant pas de haut potentiel (Planche, 2000 ; Vaivre-Douret, 2004 ; 2011). Par exemple, les enfants à haut potentiel intellectuel auraient une activité cérébrale durant la résolution de problèmes qui semble être différente de celle des enfants à haut potentiel créatif, comme une implication plus importante des aires frontales (Jaušovec, 2000), et à celle des autres enfants n'ayant pas de haut potentiel intellectuel (par ex. Duan, Shi, Wu, Mou, Cui, & Wang, 2009 ; Shaw et al., 2006). Par définition, l'une des principales caractéristiques du haut potentiel intellectuel est la démonstration d'une capacité cognitive générale au-dessus de la norme d'une population appariée en âge chronologique. Au-delà de ce QI élevé, les enfants à haut potentiel intellectuel manifestent également des particularités dans les domaines du raisonnement, de la mémoire, de l'attention et de la vitesse de traitement.

L'une des principales caractéristiques cognitives des enfants à haut potentiel intellectuel est l'utilisation préférentielle du raisonnement analogique (Caropreso & White, 1994 ; Geake, 2008 ; Planche, 2000). Le raisonnement inductif est considéré comme l'un des indicateurs prototypiques de l'aptitude de raisonnement fluide (Gf), c'est-à-dire l'utilisation d'opérations mentales de manière volontaire et contrôlée dans une situation de résolution de problèmes non familiers (Newton & McGrew, 2010). Certaines études ont montré que les enfants à haut

potentiel intellectuel présentent des performances élevées aux épreuves impliquant l'aptitude Gf (Volker, Lopata, & Cook-Cottone, 2006 ; Rowe et al., 2010). La corrélation entre l'aptitude Gf et le facteur g est extrêmement forte (Canivez, et al., 2016 ; Keith, Fine, Taub, Reynolds, & Kranzler, 2006 ; voir Kovacs & Conway, 2016 pour une discussion ; Reynolds, Keith, Flanagan, & Alfonso, 2013 ; Weiss et al., 2013). Il est donc naturel que l'aptitude Gf soit l'une des aptitudes cognitives les plus déterminantes dans l'estimation du facteur g et, par voie de conséquence, du haut potentiel intellectuel.

Une autre caractéristique essentielle chez les enfants à haut potentiel intellectuel est l'acquisition rapide de connaissances (Calero, Belen, & Robles, 2011). Ces enfants ont très précocement une base de connaissances plus vaste que leurs pairs de même âge (Steiner & Carr, 2003 ; Vaivre-Douret, 2004 ; 2011). Ils ont également des performances élevées dans l'utilisation de leurs connaissances acquises afin de résoudre des problèmes familiers. En effet, les enfants à haut potentiel intellectuel sont capables de transférer des connaissances rapidement de manière appropriée selon des contextes pouvant être très différents de la situation initiale. Il n'est donc pas étonnant que les enfants à haut potentiel intellectuel aient des performances élevées aux épreuves impliquant l'aptitude de compréhension-connaissance (Gc). En effet, cette aptitude cognitive est liée au raisonnement permettant de résoudre des problèmes familiers par l'application de connaissances et de compétences acquises par l'expérience au sein d'un milieu socioculturel particulier (Newton & McGrew, 2010 ; Schneider & McGrew, 2012). Le développement langagier a une forte influence sur l'aptitude Gc (Schipolowski, Wilhelm, & Schroeders, 2014). Or, les enfants à haut potentiel intellectuel présentent un développement atypique au niveau langagier. Avant l'âge de 2 ans (environ 22 mois, en moyenne), les enfants à haut potentiel intellectuel ont un vocabulaire précis,

ajusté avec une expression orale aisée et une utilisation correcte de la syntaxe et des temps verbaux (Vaivre-Douret, 2004 ; 2011).

L'aptitude de traitement visuel (Gv) semble également être une caractéristique des enfants à haut potentiel intellectuel (Volker et al., 2006 ; Rowe et al., 2010). Cette aptitude cognitive correspond à la capacité d'appliquer l'imagerie mentale afin de résoudre des problèmes (Schneider & McGrew, 2012). Bien que cette aptitude cognitive soit en moyenne plus élevée chez les enfants à haut potentiel intellectuel par rapport aux autres enfants de même âge, elle est source d'une importante variabilité inter-individuelle (Lubinski, 2009 ; Webb, Lubinski, & Benbow, 2007). De plus, le niveau de performance à l'aptitude Gv aurait des implications dans les performances scolaires liées aux sciences technologiques et aux mathématiques (Lubinski, 2010). Cette aptitude cognitive aurait ainsi une forte influence sur l'orientation des enfants à haut potentiel intellectuel vers des disciplines scientifiques et technologiques (Andersen, 2014 ; Webb et al., 2007).

Les enfants à haut potentiel intellectuel ont également de meilleures performances mnésiques que leurs pairs appariés en âge chronologique (Coyle, Read, Gaultney, & Bjorklund, 1998 ; Gaultney, Bjorklund, & Goldstein, 1996 ; Vaivre-Douret, 2004 ; 2011). Plus particulièrement, les enfants à haut potentiel intellectuel présentent, en moyenne, une capacité élevée en mémoire de travail, définie comme la capacité à traiter, manipuler et stocker brièvement des informations en cours d'activités cognitives (voir partie 3 pour plus de détails). La mémoire de travail joue un rôle crucial dans le fonctionnement intellectuel (Ackerman, Beier, & Boyle, 2005 ; Cornoldi & Giofrè, 2014 ; Kane, Hambrick, & Conway, 2005). Elle sollicite également d'autres aptitudes cognitives comme les capacités attentionnelles et la vitesse de traitement (Cowan et al., 2005 ; Engle, Tuholski, Laughlin, &

Conway, 1999 ; Barrouillet, & Camos, 2012 ; Fry & Hale, 2000). Les enfants à haut potentiel intellectuel ont des performances élevées dans les tâches impliquant les capacités attentionnelles, et particulièrement au niveau du contrôle attentionnel (voir partie 2 pour plus de détails). De nombreuses études ont également démontré que les enfants à haut potentiel intellectuel traitent plus rapidement les informations que leur pairs de même âge (Cohn, Carlson, & Jensen, 1985 ; Duan, Dan, & Shi, 2013 ; Fink & Neubauer, 2001 ; Johnson, Im-Bolter, & Pascual-Leone, 2003 ; Kranzler, Whang, & Jensen, 1994 ; Luciano et al., 2005 ; Paz-Baruch, Leikin, Aharon-Peretz, & Leikin, 2014). Pour autant, les aptitudes de vitesse de traitement (Gs) et de mémoire de travail (Gsm-WM) ne semblent pas être des caractéristiques cognitives suffisantes à elles seules pour identifier les enfants à haut potentiel intellectuel (Geary & Brown, 1991 ; Aubry, Gonthier & Bourdin, 2018). Cependant, ces aptitudes cognitives ont une influence sur le développement et le fonctionnement des capacités intellectuelles (Conway, Cowan, Bunting, Therriault, & Minkoff, 2002 ; Fry & Hale, 2000 ; Sheppard & Vernon, 2008). De plus, elles sont également impliquées dans les troubles des apprentissages (Johnson, Humphrey, Mellard, Woods, & Swanson, 2010 ; Peng & Fuchs, 2014). Par conséquent, leur évaluation semble essentielle afin de mieux comprendre le lien entre leur potentiel intellectuel et leur performance dans les divers domaines scolaires et professionnels.

À partir des batteries d'évaluation des capacités cognitives, le profil cognitif des enfants à haut potentiel intellectuel peut être extrêmement varié (Pereira-Fradin, 2004). Bien qu'ils aient des performances extrêmement élevées aux aptitudes Gf, Gc et Gv, ils obtiennent des performances très proches de la moyenne de la population de même âge chronologique au niveau des aptitudes Gsm et Gs (Molinero, Mata, Calero, García-Martín, & Araque-Cuenca, 2015 ; Rowe et al., 2010 ; Volker et al., 2006). Selon certains auteurs, cette hétérogénéité du

profil cognitif peut avoir un sens clinique sur le fonctionnement global de l'enfant à haut potentiel intellectuel (Guérolé, Speranza, Louis, Fourneret, Revol, & Baleyte, 2015 ; Nusbaum et al., 2017). En effet, les enfants à haut potentiel intellectuel ayant une importante hétérogénéité au niveau de leur profil cognitif auraient un fonctionnement neurologique différent de ceux ayant un profil cognitif homogène (Nusbaum et al., 2017). De plus, la présence d'une importante hétérogénéité dans le profil cognitif serait le plus souvent associé à des difficultés émotionnelles et comportementales (Guérolé et al., 2015). Cependant, de nombreuses études ont démontré que l'hétérogénéité du profil cognitif a une faible efficacité dans l'aide au diagnostic des troubles des apprentissages (Brown, 1984 ; McGill, 2016 ; 2017 ; Watkins, 2003 ; 2005 ; Watkins & Worrell, 2000). Dans la population générale, l'hétérogénéité du profil cognitif au sein d'une même batterie est assez commune (Grégoire & Wierzbicki, 2007 ; Lecerf, Kieng, & Geistlich, 2015). Alors, pourquoi les enfants à haut potentiel intellectuel auraient-ils plus souvent une forte hétérogénéité dans leur profil cognitif au sein d'une même batterie d'évaluation ?

Généralement, les aptitudes cognitives faiblement saturées par le facteur g, comme les aptitudes Gsm et Gs, ont tendance à régresser vers la moyenne. Ce phénomène psychométrique serait très probablement dû à la loi des rendements décroissants (*Spearman's Law of Diminishing Return*, en anglais) (Labouret & Grégoire, 2018). Selon cette hypothèse, plus le QI est élevé, plus la saturation des épreuves en facteur g diminue (voir Blum & Holling, 2017 pour une méta-analyse). Donc, cette hétérogénéité importante entre les performances cognitives au sein d'un profil cognitif d'une même batterie d'évaluation serait probablement le reflet de la manifestation de ce phénomène purement psychométrique (Reynolds, 2013). Toutefois, les enfants à haut potentiel intellectuel peuvent avoir une hétérochronie développementale, c'est-à-dire un développement avancé uniquement dans

certains domaines cognitifs ou/et non cognitifs par rapport aux autres domaines (Boschi, Planche, Hemimou, Demily, & Vaivre-Douret, 2016 ; Corbin, Borel, & Camos, 2013 ; Planche, 2000). La trajectoire développementale atypique des enfants à haut potentiel intellectuel serait alors liée à cette hétérochronie au sein des aptitudes cognitives, et par rapport à certaines aptitudes non cognitives. Autrement dit, les enfants à haut potentiel intellectuel disposent de capacités intellectuelles élevées et peu communes qui sont dissociées de leur expérience (Facon, Bollengier, & Grubar, 1994). Or, l'expérience est un pilier fondamental de l'acquisition de compétences. Le milieu socioculturel peut avoir des effets importants sur le déploiement de ces compétences chez les enfants à haut potentiel intellectuel. En effet, des facteurs environnementaux et intrapersonnels peuvent influencer la manifestation du potentiel de ces enfants particuliers. Certaines études ont montré que les classes constituées uniquement d'enfants à haut potentiel intellectuel (c.-à-d. le regroupement homogène) pouvaient avoir un effet négatif sur leurs émotions, leurs estimes de soi et leurs performances scolaires (voir Plucker & Callahan, 2014 pour une discussion ; Shi, Li, & Zhang, 2008). À l'inverse, certains programmes d'accélération peuvent améliorer certaines aptitudes cognitives, la régulation émotionnelle et le bien-être des enfants à haut potentiel intellectuel (Shi, Tao, Chen, Cheng, Wang, & Zhang, 2013 ; voir Steenbergen-Hu & Moon, 2010 pour une méta-analyse).

En résumé, un QI élevé n'est pas la seule caractéristique des enfants à haut potentiel intellectuel. Ils présentent des capacités élevées au niveau du raisonnement abstrait, de la mémoire, de l'attention et de la vitesse de traitement. Ces caractéristiques cognitives ont des conséquences positives sur leur capacité d'apprentissage (Calero et al., 2011 ; Calero, García-Martín, Jiménez, Kazén, & Araque, 2007). Cependant, toutes les aptitudes cognitives ont un déterminisme différent concernant les performances académiques (Aubry & Bourdin,



2016 ;Gustafsson & Balke, 1993 ; Rohde & Thompson, 2007 ; Vock, Preckel, & Holling, 2011) et l'orientation scolaire des enfants à haut potentiel intellectuel (Andersen, 2014 ; Webb et al., 2007). Il est donc plus pertinent d'aller au-delà du QI afin d'interpréter le profil des aptitudes cognitives spécifiques aux enfants à haut potentiel intellectuel dans le cadre de l'identification et de l'accompagnement scolaire (Reynolds, 2013 ; Warne, 2015).

#### **1.4. La question de l'identification du haut potentiel intellectuel**

Par définition, l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel est essentiellement tributaire de l'évaluation des capacités intellectuelles. Ces enfants particuliers sont habituellement identifiés à partir d'un QI élevé estimé à partir d'un test standardisé (McClain & Pfeiffer, 2012). Ces outils standardisés sont des éléments cruciaux afin de reconnaître la potentialité ainsi que les besoins spécifiques de ces enfants à haut potentiel intellectuel. Dans la littérature, il existe pléthore d'outils standardisés permettant d'évaluer le potentiel intellectuel des enfants (Cao, Jung, & Lee, 2017). Parmi ces outils standardisés, les évaluations d'aptitudes cognitives sont les plus utilisées pour estimer le potentiel intellectuel des enfants (voir Cao et al., 2017 pour une revue de la littérature) : 1) les évaluations multitâches ; 2) et les évaluations mono-tâches.

Les évaluations multi-tâches sont des batteries d'évaluation qui agrègent de nombreuses épreuves cognitives. L'objectif de ces batteries est de réaliser un profil cognitif le plus complet en balayant le maximum d'aptitudes cognitives possibles. L'avantage de ces évaluations multi-tâches est de réaliser une analyse normative et ipsitative des performances à partir des aptitudes cognitives évaluées (par ex. Lecerf et al. 2015). Ces batteries d'évaluation permettent également d'avoir la meilleure estimation du facteur g, défini comme la source de variance partagée par toutes les épreuves d'une même batterie d'évaluation

cognitive standardisée (Schneider, 2013). Le principal désavantage de ces batteries d'évaluation est le coût du temps d'administration. En effet, ces évaluations sont très souvent longues et sollicitent beaucoup les capacités attentionnelles de l'enfant, mais également celles du psychologue. Afin de limiter le temps d'administration, ces batteries évaluent principalement les aptitudes cognitives les plus liées au facteur *g* et les plus déterminantes des performances scolaires. Le temps d'administration reste tout de même assez long, environ 1 à 2 heures. Ces évaluations multi-tâches sont très fréquemment employées pour identifier les enfants à haut potentiel intellectuel (Cao et al., 2017 ; McClain & Pfeiffer, 2012). Parmi ces outils, le test du *Wechsler Intelligence Scale for Children* (WISC-V ; Wechsler, 2016) est le plus utilisé en Europe (Evers et al., 2012). Il se compose de 5 indices composites : l'Indice de Compréhension Verbale (ICV), l'Indice de Raisonnement Fluide (IRF), l'Indice du Raisonnement Visuo-Spatial (IVS), l'Indice de Mémoire de Travail (IMT) et l'Indice de Vitesse de Traitement (IVT). Chaque indice est estimé à partir d'épreuves impliquant des aptitudes cognitives spécifiques. Un score global (Quotient Intellectuel Total ; QIT) permet d'avoir une approximation du facteur *g* à partir de 7 épreuves évaluant également les aptitudes *Gc*, *Gf*, *Gv*, *Gsm* et *Gs*. Le QIT et les indices composites ont une moyenne de 100 et un écart-type de 15.

Les évaluations mono-tâches peuvent également être utilisées dans le cadre de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel (Cao et al., 2017). Elles correspondent à des épreuves cognitives standardisées et normées évaluant une aptitude cognitive spécifique. Les Matrices Progressives de Raven (Raven, Raven, & Court, 1998) sont un exemple d'évaluations mono-tâches, car elles évaluent principalement l'aptitude *Gf* dans la modalité non verbale (Gignac, 2015). Par conséquent, ce type d'épreuve est fortement lié au facteur *g* de l'intelligence (Gignac, 2014 ; Raven, 2000). Les évaluations mono-tâches ont

l'avantage d'avoir un temps d'administration beaucoup plus court que les tests classiques d'intelligence. Elles sont également considérées comme pratiques, car elles peuvent être administrées collectivement. Dans le cadre de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel, leur utilisation est toutefois vivement critiquée (Acar, Sen, & Cayirdag, 2016). En effet, ce type d'évaluation offre une estimation partielle du facteur g (Gignac, 2015), et les performances à ce type d'épreuve sont très influencées par l'unique modalité évaluée. Par conséquent, certains auteurs recommandent de les utiliser pour réaliser une pré-identification des enfants à haut potentiel intellectuel afin d'estimer la nécessité de poursuivre avec une évaluation plus approfondie et détaillée (McBee, Peters, & Miller, 2016).

En France, le critère essentiel de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel est la présence d'un QI élevé (Delaubier, 2002 ; Vrignaud, Bonora, & Dreux, 2005). La notion de haut potentiel intellectuel est liée à la notion de rareté, qui serait déterminée par le faible pourcentage d'individus d'un âge donné ayant un certain niveau de capacités intellectuelles à un test standardisé. Dans la littérature, le seuil de 2 écarts-types au-dessus de la moyenne de la population de référence est le plus souvent utilisé (Carman, 2013 ; Vaivre-Douret, 2011). Sachant que les capacités intellectuelles évaluées se distribuent normalement (Gottfredson, 1997a ; Warne, Godwin, & Smith, 2013), cela signifie que moins de 2,28% de la population d'une classe d'âge présenteraient un haut potentiel intellectuel. Par exemple, un enfant ayant un QIT de 130 au test du WISC-V serait considéré comme un enfant à haut potentiel intellectuel. Cependant, ce seuil est une valeur cible idéale qui peut être parfaitement fiable si et seulement si la mesure était dénuée d'erreur. Or, tous les tests psychométriques sont teintés d'erreurs de mesure, qui perturbent l'efficacité de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel (McBee, Peters, & Waterman, 2013 ; McIntosh, Dixon, & Pierson, 2005). Selon McIntosh et collaborateurs (2005), il est donc nécessaire de prendre en considération cette

erreur type de mesure de l'outil standardisé utilisé afin de définir le seuil d'identification des enfants à haut potentiel intellectuel. Par exemple, l'erreur type de mesure du WISC-V est de  $\pm 5$  points. Le QI seuil serait donc de 125 pour l'identification du haut potentiel intellectuel, soit le 95e centile de la distribution de la population de référence. La valeur seuil choisie et l'erreur type de mesure des tests utilisées ont une influence importante sur la proportion d'enfants correctement identifiés comme ayant un haut potentiel intellectuel (McBee et al., 2013). En effet, la présence de l'erreur type de mesure implique que plus le QI seuil est élevé, plus la probabilité d'identifier correctement les enfants à haut potentiel intellectuel (c.-à-d. la sensibilité de l'évaluation) diminue (voir Tableau 1).

**Tableau 1 : Estimation de l'efficacité de l'identification selon le QI-seuil au WISC-V**

| <b>QI Seuil</b> | <b>Sensibilité</b> | <b>Vrai Positif<sup>1</sup></b> | <b>Identification Incorrecte<sup>2</sup></b> |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|--|
| <b>120</b>      | 84 %               | 7,7 %                           | 16 %   |
| <b>125</b>      | 81 %               | 3,9 %                           | 19 %   |
| <b>130</b>      | 79 %               | 1,8 %                           | 21 %   |

*Note.* Simulation à partir de la méthode décrite par McBee, Peters, & Waterman (2013).

<sup>1</sup> Le pourcentage d'individus à haut potentiel intellectuel correctement identifiés par rapport au QI seuil choisi. <sup>2</sup> La proportion prédictive d'identification incorrecte est la probabilité d'identifier à tort comme ayant un haut potentiel intellectuel des enfants n'en ayant pas.

L'efficacité de l'identification du haut potentiel intellectuel est également tributaire de la stabilité temporelle des capacités intellectuelles évaluées. Il y a un large consensus concernant la stabilité du QI de l'enfance à l'âge adulte (Reeve & Bonaccio, 2011 ; Schneider, Niklas, & Schmiedeler, 2014). Cependant, cette stabilité peut varier en fonction du développement de l'individu (Schneider et al., 2014 ; Yu, McCoach, Gottfried, & Gottfried, 2018). La corrélation des capacités intellectuelles estimées à l'âge adulte est plus forte avec celles estimées lorsque ces mêmes individus étaient des enfants d'âge scolaire (c.-à-d. entre

6 et 13 ans ; Watkins & Smith, 2013). Concrètement, cela signifie qu'un enfant à haut potentiel intellectuel identifié à l'âge de 7 ans a plus de probabilité de confirmer son identification à l'âge adulte, qu'un enfant à haut potentiel intellectuel identifié à l'âge de 3 ans. Cette variation de la stabilité temporelle des capacités intellectuelles peut être induite par l'utilisation de tests d'intelligence qui diffèrent selon l'âge de l'individu (Yu et al., 2018).

Le contexte socioéconomique détermine également l'efficacité de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel (Briggs, Reis, & Sullivan, 2008 ; voir Hodges, Tay, Maeda, & Gentry, 2018 pour une méta-analyse ; McBee, 2006 ; Warne, Anderson, & Johnson, 2013). En effet, les facteurs socioéconomiques ont un effet notable sur les performances aux tests classiques d'intelligence (von Stumm & Plomin, 2014). Par exemple, les enfants ayant un niveau socioéconomique le plus élevé ont un QI moyen de 110 au test du WISC-IV, alors que les enfants ayant un niveau socioéconomique le plus faible ont en moyenne un QI de 96 (Grégoire, 2009). Par conséquent, les facteurs socioéconomiques pourraient ainsi masquer la manifestation du haut potentiel intellectuel chez les enfants issus d'un milieu socioéconomique des plus modestes (Briggs et al., 2008).

L'estimation du QI peut être également influencée par la présence de troubles des apprentissages comme le trouble spécifique du langage écrit (TSLE), le trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) ou encore le trouble d'acquisition de la coordination (TAC) (Lecerf, Bovet-Boone, Peiffer, Kieng, & Geistlich, 2016). Les enfants à haut potentiel intellectuel peuvent avoir un ou plusieurs troubles des apprentissages, ils sont appelés « enfants doublement exceptionnels » (*twice exceptional children*, en anglais) (Lovett & Lewandowski, 2006 ; Reis, Baum, & Burke, 2014). Bien qu'il n'existe pas d'études épidémiologiques des troubles des apprentissage chez les enfants à haut potentiel intellectuel,

certaines études estiment qu'il y aurait entre 1 % et 4 % d'enfants « doublement exceptionnels » parmi la population d'enfants ayant des troubles des apprentissages (Toffalini, Pezzuti, & Cornoldi, 2017 ; van Viersen, Kroesbergen, Slot, & de Bree, 2014). Cependant, les critères d'identification de ces enfants doublement exceptionnels restent toutefois discutés dans la littérature (Lovett & Sparks, 2011 ; Maddocks, 2018 ; McCoach, Kehle, Bray, & Siegle, 2001). Par exemple, l'écart entre les performances scolaires et les capacités intellectuelles semble essentiel, mais non suffisant dans la procédure d'identification des enfants « doublement exceptionnels » (Maddocks, 2018). La présence d'un trouble des apprentissages est la première cause de la sous-performance chez les enfants à haut potentiel intellectuel (Antshel, 2008 ; Hartnett, Nelson, & Rinn, 2004 ; Mullet & Rinn, 2015). Aux échelles de Wechsler, les aptitudes Gsm et Gs sont souvent déficitaires à cause de la présence d'un tel trouble (Lecerf et al., 2016). L'écart entre ces aptitudes cognitives et celles les plus saturées au facteur g peut être important et peu commun, rendant ainsi le QI non approprié pour l'identification d'un haut potentiel intellectuel (Lecerf, Reverte, Coleaux, Favez, & Rossier, 2010). Par conséquent, certains auteurs recommandent d'analyser 2 indices complémentaires (Weiss, Beal, Saklofske, Alloway, & Prifitera, 2008) : l'Indice d'Aptitude Général (IAG) et l'Indice de Compétence Cognitive (ICC). L'IAG est construit à partir des épreuves cognitive les plus saturées au facteur g, c'est-à-dire les épreuves estimant les aptitudes Gf (par ex. avec les épreuves *Matrices*, *Identification de Concepts* pour le WISC-IV et *Balance* pour le WISC-V), Gc (par ex. avec les épreuves *Similitudes*, *Vocabulaire* et *Compréhension*) et Gv (par ex. avec les épreuves *Cubes* et *Puzzle* pour le WISC-V). L'ICC se base sur les épreuves cognitives les moins saturées en facteur g et les plus sensibles aux troubles des apprentissages (Toffalini, Giofrè, & Cornoldi, 2016 ; Toffalini et al., 2017), c'est-à-dire les épreuves liées aux aptitudes Gsm (par ex. avec les épreuves *Mémoire de*

*Chiffres et Séquence Lettres-Chiffres*) et Gs (par ex. avec les épreuves *Code* et *Symbole*). La comparaison entre les scores de l'IAG, de l'ICC et du QIT peut ainsi aider le psychologue clinicien à suspecter la présence de troubles des apprentissages (Giofrè, Toffalini, Altoè, & Cornoldi, 2017 ; Lecerf et al., 2016). L'utilisation de l'IAG est fréquemment recommandée dans l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel, à cause d'une hétérogénéité fréquente dans le profil cognitif aux échelles de Wechsler et d'une potentielle présence de troubles des apprentissages (par ex. Lecerf et al., 2010 ; National Association for Gifted Children, 2008 ; Watkins, Greenawalt, & Marcell, 2002). Cependant, il est également important d'interpréter l'ICC afin d'émettre des pistes d'investigation approfondie sur le décalage éventuel entre le potentiel intellectuel et les performances scolaires (Rowe et al., 2010).

L'identification des enfants à haut potentiel intellectuel basée sur des tests classiques d'intelligence semble donc être une méthode ayant de nombreux obstacles. Dans la littérature, il existe également d'autres outils, tels que les hétéro-questionnaires comme le *Gifted Rating Scales–School Form* (GRS ; Pfeiffer & Jarosewich, 2003) ou l'*Inventaire d'identification* (Terrassier, 1999). Toutefois, ce type de questionnaires ne semble pas avoir été validé en langue française ou avoir subi une quelconque validation psychométrique. D'autres auteurs ont montré que l'évaluation dynamique du potentiel d'apprentissage pourrait être également une piste intéressante dans le processus d'identification des enfants à haut potentiel intellectuel (Calero et al., 2011). Cependant, les résultats ne semblent pas être consistants dans la littérature (Vogelaar, Bakker, Elliott, & Resing, 2016). Dans certains pays, principalement aux États-Unis, les enfants à haut potentiel intellectuel peuvent aussi être identifiés par la simple observation des professeurs (Kornmann, Zettler, Kammerer, Gerjets, & Trautwein, 2015 ; McBee et al., 2016). Cette désignation par les enseignants est une

méthode d'identification qui génère une importante proportion d'enfants incorrectement identifiés comme ayant un haut potentiel intellectuel (McBee et al., 2016). Par conséquent, il subsiste un manque d'outils standardisés fiables et valides, autres que les tests classiques d'intelligence, pour aider à l'identification de ces enfants en France (Vrignaud et al., 2005).

En résumé, les enfants à haut potentiel intellectuel ont des caractéristiques cognitives particulières qui pourraient être potentiellement des indicateurs fiables dans la procédure d'identification. En effet, la recherche actuelle soutient l'utilisation de critères multiples afin d'identifier le plus efficacement les enfants à haut potentiel en général, et les enfants à haut potentiel intellectuel en particulier (Bélangier & Gagné, 2006 ; Fernández, García, Arias-Gundín, Vázquez, & Rodríguez, 2017 ; McBee et al., 2016). Néanmoins, il y a un décalage entre les recommandations réalisées dans le cadre de la recherche et celles réalisées dans la pratique (Friedman-Nimz, 2009). Ce type de stratégies d'identification obligent à utiliser plusieurs outils psychométriques afin d'identifier les enfants à haut potentiel intellectuel à partir de leurs spécificités (Fernández et al., 2017). Or, il y a très peu d'outils standardisés, normés et adaptés pour l'identification de ces enfants et pour l'évaluation de leur développement (McCoach, Rambo, & Welsh, 2012 ; Vock & Holling, 2008). Les échelles de Wechsler sont les outils les plus utilisés dans le domaine du haut potentiel intellectuel. Cependant, la durée d'administration des échelles classiques d'intelligence, comme le WISC-V, peut empêcher une investigation plus approfondie d'autres aptitudes cognitives qui améliorerait l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel. Dans une stratégie d'identification multi-critériée, l'utilisation d'une forme abrégée des versions récentes des échelles de Wechsler donnerait un gain de temps nécessaire pour réaliser une évaluation plus détaillée. Ce large profil cognitif aiderait à développer un accompagnement éducatif et pédagogique le plus adapté pour ces enfants. Ainsi la première étude de ce travail de thèse



s'est intéressée à l'élaboration de formes abrégées des récentes échelles de Wechsler les plus appropriées à l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel.

## **ARTICLE 1 - SHORT FORMS OF WECHSLER SCALES ASSESSING THE INTELLECTUALLY GIFTED CHILDREN USING SIMULATION DATA**

Afin de répondre aux besoins éducatifs de ces enfants à haut potentiel intellectuel (Delaubier, 2002), il est important de les identifier rapidement et d'investiguer les différentes caractéristiques cognitives et socioémotionnelles pouvant éventuellement entraver leur performances scolaires (Kroesbergen, van Hooijdonk, van Viersen, Middel-Lalleman, & Reijnders, 2015 ; Litster & Roberts, 2011 ; Neihart, 1999 ; Pierson, Kilmer, Rothlisberg, & McIntosh, 2011). Pour faciliter cette investigation approfondie, il serait préférable d'utiliser une forme abrégée des versions récentes du test *Wechsler Intelligence Scale for Children* (WISC-IV ; Wechsler, 2005 ; WISC-V ; Wechsler, 2016). L'objectif de cet article est de déterminer les meilleures formes abrégées, en terme de qualités psychométriques (c.-à-d. fiabilité et validité), pour l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel.

Les enfants à haut potentiel intellectuel ont des performances plus élevées aux épreuves impliquant les aptitudes Gc, Gf et Gv que celles liées aux aptitudes Gsm et Gs (Rowe et al., 2010 ; Volker et al., 2006). L'IAG permet d'estimer principalement les aptitudes Gc, Gf et Gv qui sont donc les plus discriminantes dans l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel. Cet indice est souvent considéré comme une forme abrégée des échelles de Wechsler. Cependant, une forme abrégée d'un test doit réduire le temps d'administration d'au moins 50 % (Levy, 1968). Or, l'IAG réduit environ de 23 % le temps d'administration (Ryan, Glass, & Brown, 2007). Fort de ce constat, il est donc nécessaire de réaliser une forme abrégée des échelles de Wechsler à partir des épreuves les plus discriminantes dans l'identification des enfants à haut potentiel.

Dans la littérature, certains auteurs utilisent 2 ou 4 épreuves pour estimer un QI abrégé à partir des échelles de Wechsler pour identifier les enfants à haut potentiel intellectuel (Alloway & Elsworth, 2012 ; Shaw et al., 2006 ; van Viersen et al., 2014 ; van Viersen, de Bree, Kroesbergen, Slot, & de Jong, 2015). À notre connaissance, les qualités psychométriques de ces formes abrégées n'ont jamais été éprouvées dans le cadre de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel. Dans ce présent article, 18 QI abrégés ont été créés à partir de toutes les combinaisons possibles de 2 et 4 épreuves cognitives parmi les 8 évaluant les aptitudes Gc, Gf et Gv aux tests WISC-IV (Wechsler, 2005) et WISC-V (Wechsler, 2016).

Dans cette perspective, l'étude a été réalisée en 7 étapes : 1) 9 QI abrégés du WISC-IV ont été calculés à partir de la somme des scores standards des épreuves choisies (c.-à-d. *Similitudes, Compréhension, Vocabulaire, Cubes, Identification de concept* et *Matrices*) en utilisant la méthode d'équation linéaire (Tellegen & Briggs, 1967) ; 2) une simulation de 1 000 000 de données a été réalisée à partir de la décomposition de Choleski de la matrice de corrélation du WISC-IV (Tableau 4.1 ; Wechsler, 2005) ; 3) une comparaison des paramètres psychométriques (c.-à-d. la fidélité et la validité) a été effectuée à partir des données empiriques, issues d'un échantillon de 117 enfants à haut potentiel intellectuel (moyenne d'âge : 10,39, Écart-Type : 1,03, 74 % garçons) et de 52 enfants n'ayant pas de haut potentiel intellectuel (moyenne d'âge : 10,57, Écart-Type : 2,66, 79 % garçons), et des données issues de la simulation ; 4) parmi les 9 QI abrégés du WISC-IV, les 3 QI abrégés ayant la meilleure fidélité et validité ont été sélectionnés à partir des données issues de la simulation ; 5) pour chaque QI abrégé du WISC-IV, les indicateurs de la courbe de *Receiver Operating Characteristic* (ROC) ont été estimés à partir de l'échantillon empirique : la sensibilité, la spécificité, le taux de faux positif, le taux de faux négatif et l'aire sous la courbe (*Area Under*

*Curve*, en anglais ; AUC) qui permettent d'estimer la performance de chaque QI abrégé à la classification des enfants à haut potentiel intellectuel (Fawcett, 2006) ; 6) À partir de la simulation de 1 000 000 de données basée sur la matrice de corrélation du WISC-V (Tableau 4.1 ; Wechsler, 2016), 9 QI abrégés ont été réalisés avec la somme des scores standards des épreuves choisies (c.-à-d. *Similitudes*, *Compréhension*, *Vocabulaire*, *Cubes*, *Matrices*, *Balance* et *Puzzle*) en utilisant la méthode d'équation linéaire (Tellegen & Briggs, 1967) ; 7) parmi les 9 QI abrégés du WISC-V, les 3 meilleures formes abrégées ont été mis en évidence à partir des paramètres psychométriques estimés.

Les résultats de cette étude montrent que l'estimation des indicateurs de fiabilité et de validité avec l'échantillon de données simulées est très proche de celle des données empiriques. Cette étude souligne la performance élevée des différentes formes abrégées du WISC-IV pour identifier les enfants à haut potentiel intellectuel. Les formes à 4 épreuves ont de meilleurs indicateurs de fiabilité et de validité que celles à 2 épreuves. De plus, les formes à 4 épreuves fournissent un bon compromis entre la durée d'administration, les qualités psychométriques satisfaisantes et la précision d'estimation du potentiel intellectuel (Gignac, 2015). Malgré un nombre conséquent de changements entre les deux versions de l'échelle de Wechsler, les résultats de cette étude montre que la forme *Similitudes* + *Vocabulaire* + *Matrice* + *Cubes*, au WISC-IV et au WISC-V, est globalement efficace dans l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel. Cette forme abrégée évaluerait les 3 aptitudes cognitives les plus discriminantes des enfants à haut potentiel intellectuel, à savoir les aptitudes Gc, Gf et Gv (Rowe et al., 2010 ; Volker et al., 2006). De plus, les épreuves qui la composent paraissent moins influencées par les troubles des apprentissages (Toffalini et al., 2016 ; 2017). Bien que les formes abrégées avec 2 épreuves soient moins performantes que celles à 4 épreuves, la forme *Similitudes* et *Matrice* apparaît fournir la meilleur efficacité pour

identifier les enfants à haut potentiel intellectuel parmi les autres formes abrégées issues de 2 épreuves. Ces 2 formes abrégées semblent fournir en moyenne des performances satisfaisantes dans l'identification afin de poursuivre l'investigation des capacités cognitives ou socioémotionnelles avec des évaluations complémentaires (Prewett, 1995). En effet, le gain de temps permis par ces formes abrégées peut permettre au chercheur ou au psychologue clinicien de compléter l'investigation par d'autres évaluations cognitives, telles que l'évaluation des capacités attentionnelles ou de la capacité de la mémoire de travail avec des tâches d'empan complexe (par ex. Gonthier, Aubry & Bourdin, 2017).

# Short Forms of Wechsler Scales Assessing the Intellectually Gifted Children Using Simulation Data

Alexandre Aubry <sup>1</sup> and Béatrice Bourdin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Picardie Jules Verne, EA7273 CRP-CPO, Amiens, France

Publié dans *Frontiers in Psychology* (2018), 9, 1-12. doi:10.3389/fpsyg.2018.00830

Running title: Short-Forms of the Wechsler Scales in Gifted Children

**Keywords:** intelligence, brief assessment, gifted children, short-form, screening tools

## Abstract

Intellectual giftedness is usually defined in terms of having a very high Intellectual Quotient (IQ). The intellectual capacity is assessed by a standardized test such as the Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC). However, the identification of intellectually gifted children (IGC) often remains time-consuming. A short-form WISC can be used as a screening instrument. The practitioners and researchers in this field can then make a more in-depth evaluation of the IGC's cognitive and socioemotional characteristics if needed. The aim of our study is thus to determine the best short tests, in terms of their psychometric qualities, for the identification of IGC. The current study is composed of three-step analyses. Firstly, we created 9 IQs short forms (IQ<sub>SF</sub>) with 2-subtests, and 9 IQ<sub>SF</sub> with 4-subtests from the WISC-IV (Wechsler, 2005). Secondly, we estimated psychometric parameters (i.e., reliability and validity) from empirical and simulated dataset with WISC-IV. The difference in the estimation of psychometric qualities of each IQ<sub>SF</sub> from the simulated data is very close to those derived from empirical data. We thus selected the 3 best IQ<sub>SF</sub> based on these psychometrics parameters estimated from simulated datasets. For each selected short form of the WISC-IV, we estimated the screening quality in our sample of IGC. Thirdly, we created IQ<sub>SF</sub> with 2- and 4-subtests from the WISC-V (Wechsler, 2016) with simulated dataset. We then highlighted the 3 best short forms of WISC-V based on the estimated psychometric parameters. The results are interpreted in terms of validity, reliability and screening quality of IGC. In spite of the important changes in the WISC-V, our findings show that the 2-subtest form, *Similarities + Matrix Reasoning*, and the 4-subtest form, *Similarities + Vocabulary + Matrix Reasoning + Block Design*, are the most efficient to identify the IGC at the 2 recent versions of Wechsler scales. Finally, we discuss the advantages and drawbacks of a brief assessment of intellectual aptitudes for the identification of the IGC.

## **1. Introduction**

In the sphere of education, the rapid and reliable evaluation of a child's global intellectual capacity is important for an efficient identification of intellectually gifted children (IGC). Indeed, such evaluation contributes in proposing specific educational programs (e.g. accelerated or enrichment programs). In this context, a short evaluation can initially be used to assess a child's intellectual giftedness. It can then serve to determine whether a more in-depth evaluation of the child's cognitive and socioemotional characteristics is needed.

The importance and usefulness of cognitive ability assessments for the identification of IGC have long been recognised by the scientific community as a means of facilitating the integration of IGC in specialised school programs (Pierson, Kilmer, Rothlisberg, & McIntosh, 2012; Simpson et al., 2002). Furthermore, special education such as enrichment education has proved to impact positively on their cognitive skills (Shi et al., 2013). Consequently, an early identification of intellectual giftedness appears to be a predictor of not only their psychological well-being (Kroesbergen, van Hooijdonk, van Viersen, Middel-Lalleman, & Reijnders, 2016; Litster & Roberts, 2011; Neihart, 1999), but also their professional success as adults (Rinn & Bishop, 2015).

Intellectual giftedness is usually defined in terms of a high Intellectual Quotient (IQ) resulting from a standardised and validated intelligence test (see Lovett & Lewandowski, 2006; Winner, 2000). The Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-IV; Wechsler, 2005; WISC-V; Wechsler, 2016) is one of the most common tools used by both researchers and clinicians for the evaluation of intellectual capacity (Evers et al., 2012). It is currently used to identify intellectually gifted children in school (McClain & Pfeiffer, 2012). It allows a person's global intellectual potential to be estimated on the basis of a Full Scale Intellectual



Quotient (FSIQ). The most commonly considered threshold value of the FSIQ is a score greater than or equal to 130, i.e. 2 standard deviations above the average (Carman, 2013). However, this cutoff is an ideal target value. Very high cutoffs also require a very high level of reliability in the measurement, in order to ensure satisfactory identification performance. Indeed, the measurement error has an influence on the identification of IGC (McIntosh, Dixon, & Pierson, 2005). It perturbs the accuracy of decisions related to their identification (McBee, Peters, & Waterman, 2013). According to McIntosh, Dixon and Pierson (2005), a threshold FSIQ value of 125, i.e. the 95th percentile, appears to be a reasonable choice for the identification of IGC. In the current study, we retained this cutoff of 125 in Wechsler's scale to identify IGC.

The recent versions of Wechsler scales are explicitly developed on the basis of the theoretical model of Carroll-Horn-Cattell (CHC; Keith, Fine, Taub, Reynolds, & Kranzler, 2006; Golay, Reverte, Rossier, Favez, & Lecerf, 2013; Lecerf, Rossier, Favez, Reverte, & Coleaux, 2010; Weiss, Keith, Zhu, & Chen, 2013). The literature is consensual with regard to the number of global cognitive abilities evaluated by the WISC-IV (Reverte, Golay, Favez, Rossier, & Lecerf, 2015) or WISC-V (Reynolds & Keith, 2017). Subtests are posited to estimate global cognitive aptitudes: *Similarities*, *Vocabulary* and *Comprehension* are considered to evaluate the Comprehension-Knowledge (Gc) ability; *Pictures Concept*, *Figure Weights* (only WISC-V) and *Reasoning Matrix* are considered to estimate Fluid reasoning (Gf) ability; *Block Design* and *Visual Puzzle* (only WISC-V) are posited to evaluate mainly Visual processing (Gv) ability; *Digit Span*, *Picture Span* (only WISC-V) and *Letter-Number Sequencing* are considered to evaluate Short-memory ability (Gsm), and *Coding* and *Symbol* target processing Speed (Gs) ability.

In practice, IGC have higher performance for Gc, Gf and Gv than for Gsm and Gs (Rowe, Kingsley, & Thompson, 2010; Volker, Lopata, & Cook-Cottone, 2006). It thus appears that IGC performed more efficiently in terms of high-level abilities than in terms of low-level abilities. The consequence of this is the presence of strong scatter scores in Wechsler scale with IGC. According to Flanagan and Kaufman (2009), an important and uncommon variability can affect the interpretation of the FSIQ. Indeed, the aim of the FSIQ is to summarize all cognitive aptitudes assessed by the scale. The FSIQ score is designed to estimate Spearman's *g* factor (1904). If the tests are too heterogeneous, the common variance between tests decreases and the mean value of the performance does not provide a satisfactory representation of the overall cognitive aptitude. This abnormal variability between scores in Wechsler scale could have an impact on the estimation of a child's overall intellectual functioning (Lecerf, Kieng, & Geistlich, 2015). To mitigate this problem, Weiss, Beal, Saklofske, Alloway and Prifitera (2008) proposed a new indicator: the Global Aptitude Index (GAI). This is estimated from subtests used mainly to evaluate Gc, Gf and Gv abilities. These are the most highly *g*-saturated core subtests (Keith et al., 2006; Lecerf et al., 2010). The GAI would thus provide a better estimation of overall cognitive functioning when low *g*-loaded cognitive aptitudes are lower than the high *g*-loaded cognitive aptitudes (Lecerf, Bovet-Boone, Peiffer, Kieng, & Geistlich, 2016; Sattler & Ryan, 2009; Watkins, Greenawalt, & Marcell, 2002). Considering the discrepancies in performance for the low- and high-level cognitive abilities in IGC, the use of GAI appears to be more judicious than the FSIQ in the context of the identification of IGC (Newman, Sparrow, & Pfeiffer, 2008). The GAI also has a satisfactory reliability with regard to both short and long-term stability (Watkins & Smith, 2013 ; Kieng, Rossier, Favez, & Lecerf, 2013). It is often used to include the gifted children in special education such as enrichment or accelerated programs (Saklofske, Weiss, Raiford,

& Prifitera, 2005; Pierson et al., 2012). The GAI is often considered as an abbreviated form of the Wechsler scale for the identification of IGC. However, the short form of a test should reduce the examination time by at least 50% (Levy, 1968). The GAI reduces the administrative time by approximately 23% (Ryan, Glass, & Brown, 2007). As a consequence, the identification of IGC often remains time-consuming, even with the GAI.

In order to reduce the examination time of a cognitive ability test, the most commonly used solution described in the literature is to reduce the number of subtests retained to estimate the global cognitive functioning (Silverstein, 1990). This time should not be gained at the cost of predictive accuracy (Doppelt, 1956). The use of short forms comprising more than 4 subtests only weakly increases the reliability of the measurement with respect to the cost in terms of examination time (Karnes & Brown, 1981).

The usefulness of brief intellectual assessment is controversial, because it prevents to analyse the cognitive profile which can be essential in the learning disabilities context (Fiorello, Hale, McGrath, Ryan, & Quinn, 2001; Hale, Fiorello, Kavanagh, Holdnack, & Aloe, 2007). Nevertheless, the brief intellectual assessment may be useful to estimate the intellectual potential. Indeed, several short forms of the WISC-IV have been validated in various languages (e.g. Crawford, Anderson, Rankin, & MacDonald, 2010; in English; Dasi, Soler, Bellver, & Ruiz, 2014, in Spanish). These short forms have been used to obtain a rapid and reliable evaluation of intellectual ability in children with an intellectual disability (McKenzie, Murray, Murray, & Murray, 2013; Murray, McKenzie, & Murray, 2016), children having a high-functioning autism spectrum (Thomeer et al., 2012), children affected by epilepsy (Hrabok, Brooks, Fay-McClymont, & Sherman, 2012) or children affected by traumatic brain injury (Donders, Elzinga, Kuipers, Helder, & Crawford, 2013). Recent

studies have used shortened versions of the Wechsler scale with 2 or 4 subtests, for the detection of IGC (Alloway & Elsworth, 2012 ; van Viersen, Kroesbergen, Slot, & de Bree, 2014; van Viersen, de Bree, Kroesbergen, Slot, & de Jong, 2015; Shaw et al., 2006). Most of these short forms have been constructed on the basis of subtests evaluating high-level cognitive abilities such as verbal comprehension and perceptive reasoning. Although there are short forms of the previous versions of the Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-R and WISC-III) as well as other sets of cognitive ability evaluations for the identification of IGC (Dirks, Wessels, Quarfoth, & Quenon, 1980 ; Karnes & Brown, 1981; Killan & Hughes, 1978; Mark, Beal, & Dumont, 1998; Ortiz & Gonzalez, 1989; for a review Pierson et al., 2012; Reiter, 2004; Simpson et al., 2002), to our knowledge, no short form of the WISC-IV or WISC-V has been tested with respect to its psychometric qualities in this atypically developing population. With respect to the use of shortened tests of cognitive ability as a decisional aid for the identification of IGC, Prewett (1995) suggests that shortened tests should generate scores that are comparable with those obtained with a battery of global assessment tests. It is thus necessary to compare the mean values of the short scale with that of the full scale. If a discrepancy between the IQ short form ( $IQ_{SF}$ ) and the FSIQ is within 2 standard errors of measurement (SEM), the  $IQ_{SF}$  is considered as stable (Kieng et al., 2013; Meyers, Zellinger, Kockler, Wagner, & Miller, 2013).

In the literature, some authors use 2 or 4 subtests to estimate  $IQ_{SF}$  score from Wechsler scale to identify IGC (Alloway & Elsworth, 2012; van Viersen, Kroesbergen et al., 2014; van Viersen, de Bree et al., 2015; Shaw et al., 2006). To our knowledge, the psychometric qualities of these short forms have never been tested for the identification of IGC. In the present study, we make nine  $IQ_{SF}$  from all possible combinations of 2 or 4 subtests in Verbal Comprehension Index (VCI) and Performance Reasoning Index (PRI). We compare

reliability, validity and screening qualities with each other. We excluded the subtests involving the working memory, because these subtests are also known to be affected negatively by specific learning disabilities (Cornoldi, Giofrè, Orsini, & Pezzuti, 2014; Maehler & Schuchardt, 2009; Toffalini, Giofrè, & Cornoldi, 2017). While IGC are known to elicit high performances in working memory tasks (Calero, García-Martín, Jiménez, Kazén, & Araque, 2007; Hoard, Geary, Byrd-Craven, & Nugent, 2008; Ruthsatz & Urback, 2012), these subtests can underestimate the overall cognitive performance in the context of specific learning disability. All short forms based on subtests from VCI and PRI make it possible to obtain an estimation of the FSIQ and GAI scores in less than 30 minutes. The aim of our study is thus to determine the best short scales, in terms of their psychometric qualities, for the identification of IGC.

## **2. Methods**

### **2.1. Participants**

The data was collected from the WISC-IV produced by 117 French IGC (mean age : 10.39, SD: 1.03, 74% boys) and 52 French intellectually typical children (mean age : 10.57, SD: 2.66, 79% boys). Clinician psychologists gave us the data completely anonymous and in the respect of French deontological code. To preserve the anonymity of the children, we chose not to contact the parents and their children. The groups did not significantly differ in terms of age,  $t(57.902) = -0.485$ ,  $p = .629$ ,  $d = -0.109$ , or gender,  $\chi^2(1) = 0.550$ ,  $p = .458$ . The children were contacted through teachers, school psychologists or licensed psychologists. In order to allow for measurement errors, the inclusion criterion for intellectually gifted group was set to FSIQ or GAI score greater than or equal to 125 in accordance with the current recommendation (Assouline, Foley-Nicpon & Whiteman, 2010; Brasseur & Grégoire, 2010; McIntosh, Dixon & Pierson, 2005).

## 2.2. Procedure

All of the statistical analyses were made using version 3.4.2 of R software (R Core Team, 2017). We estimated the interclass correlation of each IQ<sub>SF</sub> and the full-scale using the *irr* library (Gamer, Lemon, Fellows & Singh, 2012) and the hierarchical omega ( $\omega_H$ ) of each IQ<sub>SF</sub> using the *MBESS* library (Kelley, 2018). We also computed the 95% confidence intervals for the correlation comparisons (Zou, 2007) using the *cocor* library (Diedenhofen & Musch, 2015).

The data relevant to the preparation of short forms was extracted from fully administered WISC-IV protocols. The FSIQ scores were computed from 10 core subtests from the WISC-IV. The GAI scores were obtained from the VCI and PRI (Lecerf, Reverte, Coleaux, Favez & Rossier, 2010).

The current study is composed of three steps in our statistical analyses. Firstly, the scores from different IQ<sub>SF</sub> were computed using the linear equation method (Tellegen & Briggs, 1967). They were divided by the sum of the standard scores given by the VCI (Vocabulary [Vo], Similarities [Si] and Comprehension [Co]) and PRI (Block Design [Bd], Picture Concepts [Pc] and Matrix Reasoning [Mr]). Secondly, we realized a simulation of 1,000,000 data with the Choleski decomposition from correlation matrix of WISC-IV (Table 4.1 ; Wechsler, 2005) using the *mvtnorm* library (Genz et al., 2018) (see Giofré et al., 2017 for a similar approach). We realized a comparison between psychometrics parameters (i.e. reliability and validity) estimated from empirical and simulated datasets. Then, we selected the three best IQ<sub>SF</sub> based on these psychometrics parameters estimated from simulated dataset. For each selected short form WISC-IV, we computed the indicators of a receiver operating characteristic (ROC) such as the sensitivity, the sensibility, the false positive rate

(FPR), the false negative rate (FNR) and the Area Under Curve (AUC) from our empirical sample using the pROC library (Robin et al., 2011). The AUC is used as a general measure to estimate the performance of the IGC classification (Fawcett, 2006). Thirdly, we realized another simulated dataset from correlation matrix of WISC-V (Table 4.1 ; Wechsler, 2016). From this simulated dataset, we created the different short forms of WISC-V. We then highlighted the three best short forms of WISC-V based on the estimated psychometrics parameters from simulated dataset.

The data and R script used for the simulations and the statistical analyses are available on the Open Science Framework (OSF) at <http://osf.io/dax8p>

### **2.3. Statistical analyses**

Nine IQ<sub>SF</sub> derived from 2-subtest forms, and 9 IQ<sub>SF</sub> derived from 4-subtest forms were computed from 3 PRI and 3 VCI subtests. For each IQ<sub>SF</sub> , the threshold of intellectual giftedness identification was superior to 125, i.e. the 95th percentile.

It is essential to evaluate reliability and validity when selecting the best short form (Cyr & Brooker, 1984). For each form that we prepared, reliability and validity indices were thus computed.

#### **2.3.1. Index of reliability**

##### **2.3.1.1. Alpha**

The reliability of each form was determined by a composite reliability coefficient ( $r_{cc}$ ) according to equation 1 from Tellegen and Briggs (1967), based on a table of internal consistency and inter-correlations of the applied subtests derived from the WISC-IV manual (Table 4.1 & Table 5.1 from Wechsler, 2005) and the WISC-V manual (Table 4.1 & Table 5.1 from Wechsler, 2016). This index allows the standard error of each short form measurement

to be determined. The composite reliability coefficient is frequently used to estimate the reliability of the abridged scale (Denney, Ringe, & Lacritz, 2015; Donders et al., 2013; Ryan & Ward, 1999; Girard et al., 2015; Girard, Axelrod, & Wilkins, 2010).

$$r_{cc} = \frac{\sum r_{jj} + 2 \times \sum r_{jk}}{n + 2 \times \sum r_{jk}} \quad (1)$$

where  $r_{jj}$  is the reliability coefficient of the  $j^{\text{th}}$  subtest in IQ<sub>SF</sub>,  $n$  is the number of subtests in IQ<sub>SF</sub>,  $r_{jk}$  is the correlation coefficient between the  $j^{\text{th}}$  subtest and the  $k^{\text{th}}$  subtest used for IQ<sub>SF</sub>.

### 2.3.1.2. Hierarchical omega

In contrast to the coefficient alpha reliability, the coefficient omega ( $\omega$ ) takes into account the unequal factor loadings (Watkins, 2017). In particular, the hierarchical omega ( $\omega_H$ ) has also the advantage to be unaffected by the fitting factorial analysis model (Kelley & Pornprasertmanit, 2016). So,  $\omega_H$  can be a better index of the reliability of a composite score from Wechsler scale than alpha coefficient (Gignac & Watkins, 2013). This index estimates the variation portion which is involved by the general factor. High value of  $\omega_H$  indicates that a general factor explains a large part of variation in the composite score.  $\omega_H$  coefficient is considered as reliable if it exceeds .50 at minimum, but  $\omega_H$  superior or equal to .75 is considered better (Reise, Bonifay, & Haviland, 2013).

### 2.3.1.3. Interclass Correlation Coefficient

In addition, we used the Interclass Correlation Coefficient (ICC ; model A.1 in McGraw & Wong, 1996) to examine the reliability of both the IQ<sub>SF</sub> and the full-scale scores.



### 2.3.2. Index of validity

Three validity indices were estimated: the convergent validity determined by the corrected correlation between the short form and the full form of the scale ( $r'$ ), the degree of discrepancy computed as the difference between the IQ<sub>SF</sub> score and the full form score (FSIQ or GAI), and the accuracy of the estimation of the full form scores (Cacc).

#### 2.3.2.1. Convergent validity

The convergent validity of each form was determined by computing its correlation (Pearson's  $r$ ) with the FSIQ and GAI scores. These correlations were then corrected ( $r'$ ; Equation 2) by taking the redundancy of the variance error into account, using the modified version (Girard & Christensen, 2008) of the Levy formula (1967). The forms were indeed prepared from 2 or 4 tests taken from the entirely administered scale. The correlation between the forms and the full forms (FSIQ or GAI) is artificially increased by the measurement error shared between the two forms:

$$r' = r_{sf} - (1 - r_{cc}) \times \frac{\sqrt{p + 2 \times r_{jk}}}{\sqrt{10 + 2 \times r_{lm}}} \times \frac{SD_{sf}}{15} \quad (2)$$

where  $r'$  is the corrected correlation coefficient ;  $r_{sf}$  is the uncorrected correlation coefficient between the score of the short form (QI<sub>SF</sub>) and the full scale (FSIQ or GAI),  $r_{cc}$  is the composite reliability coefficient of QI<sub>SF</sub>,  $r_{jk}$  is the correlation coefficient between the  $j^{th}$  subtest and the  $k^{th}$  subtest used for IQ<sub>SF</sub>,  $r_{lm}$  is the correlation coefficient between subtest  $l$  and subtest  $m$ , used for the FSIQ or the GAI,  $p$  is the number of subtests used for the IQ<sub>SF</sub>,  $SD_{SF}$  is the standard deviation of the QI<sub>SF</sub>.

### **2.3.2.2. Degree of discrepancy**

The paired Student t tests were computed in order to determine whether the average of the IQ<sub>SF</sub> scores was significantly different at the average of the FSIQ or GAI scores. This index allows us to define whether the measurement provided by the scale is significantly different at that of the full scale. The extent of this effect (Cohen's d for correlated samples comparison ; Lakens, 2013) was estimated, in order to determine the magnitude of the difference in mean computed value.

### **2.3.2.3. Accuracy**

An indicator of the accuracy (Cacc) of the estimation of FSIQ or GAI from the IQ<sub>SF</sub> score was prepared, in order to identify the percentage of individuals in our sample having a IQ<sub>SF</sub> score greater than or equal to the threshold value of 125. The indicator Cacc also takes into account the measurement stability between the IQ<sub>SF</sub> score and the FSIQ and GAI scores. Usually, this stability is determined by the difference between two scores in the range between -2 and +2 standard errors of measurement (Meyer et al., 2013). Cacc is a coefficient lying in the range between 0 and 1. It can be interpreted as the accuracy of IGC identification. The closer Cacc is to 1, the more accurate the IQ<sub>SF</sub> score-based identification.

In order to simplify the interpretation of multiple psychometric reliability and validity scores, we construct a composite indicator (Rc) based on the approach proposed by Cyr & Brooker (1984), and adapted by Girard & Christensen (2008). Rc corresponds to the unweighted average of 4 computed reliability and validity indicators, i.e. the composite reliability coefficient (rcc), the hierarchical omega ( $\omega_H$ ), the interclass correlation coefficient (ICC), the corrected correlation (r') between the IQ<sub>SF</sub> score and the FSIQ and GAI scores, the identification accuracy (Cacc). We thus reproduced and adapted the psychometric agreement

indicator of Girard & Christensen (2008), with our forms and the full form of the Wechsler scale. This makes it possible to interpret the strength of agreement, which ranges from 0 (absence) to 1 (perfect), between the  $IQ_{SF}$  score and the FSIQ and GAI scores (Girard, Axelrod, Patel & Crawford, 2015).

### **3. Results**

#### **3.1. Description of the sample**

All of the participants obtained a GAI score equal to, or greater than 125. The descriptive data from our sample, as well as the mean and standard deviation of the FSIQ, the GAI, and the subtests from WISC-IV, are shown in Table 1.

**Table 1: Descriptive statistics of the sample**

| Variables         | Intellectually gifted children<br>(n = 117) |       |       | Typical children<br>(n = 52) |       |       | $d_S^1$ |
|-------------------|---|-------|-------|------------------------------|-------|-------|---------|
|                   | M (SD)                                      | Skew. | Kurt. | M (SD)                       | Skew. | Kurt. |         |
| Age (in months)   | 124.65 (12.34)                              | 0.31  | -0.99 | 126.87 (31.88)               | 0.43  | -0.89 | -0.109  |
| <b>Gender (%)</b> |   |       |       |                              |       |       |         |
| Male              | 73.50                                       | -     | -     | 78.85                        | -     | -     |         |
| Female            | 26.50                                       | -     | -     | 21.15                        | -     | -     |         |
| <b>WISC-IV</b>    |   |       |       |                              |       |       |         |
| Block Design      | 13.46 (2.62)                                | 0.43  | -0.27 | 9.85 (2.67)                  | 0.46  | 0.46  | 1.372** |
| Similarities      | 17.17 (1.99)                                | -0.65 | -0.96 | 12.48 (2.32)                 | 0.31  | -0.19 | 2.239** |
| Digit Span        | 12.97 (2.94)                                | 0.19  | -0.19 | 10.08 (2.68)                 | 0.11  | -0.44 | 1.013** |
| Picture Concepts  | 14.30 (2.21)                                | 0.82  | 0.20  | 9.44 (2.34)                  | 0.00  | -1.06 | 2.159** |
| Vocabulary        | 16.44 (2.02)                                | -0.35 | -0.83 | 12.25 (2.22)                 | 0.11  | -0.71 | 2.014** |
| LNS               | 13.13 (2.28)                                | 0.06  | 0.18  | 10.15 (2.73)                 | -0.47 | 1.01  | 1.228** |
| Matrix Reasoning  | 13.72 (2.38)                                | -0.25 | 0.20  | 10.75 (1.79)                 | -0.17 | -0.77 | 1.338** |
| Comprehension     | 15.63 (2.44)                                | -0.29 | -0.71 | 11.58 (2.84)                 | -0.63 | 2.06  | 1.579** |
| Coding            | 11.26 (2.96)                                | -0.06 | -0.05 | 9.06 (3.08)                  | 0.45  | 0.15  | 0.734** |
| Symbol            | 11.72 (3.00)                                | 0.07  | 0.14  | 9.69 (3.46)                  | -0.52 | 0.00  | 0.643** |
| FSIQ              | 134.92 (9.43)                               | 0.03  | -0.82 | 104.37 (8.35)                | -0.33 | -0.68 | 3.353** |
| GAI               | 137.09 (7.66)                               | 0.20  | -0.29 | 107.58 (5.84)                | -0.88 | -0.15 | 4.127** |

*Note.* N = 169; LNS: Letter-Number Sequencing; VCI: Verbal Comprehension Index; PRI: Performance Reasoning Index; WMI : Working Memory Index; PSI: Processing Speed Index; FSIQ: Full Scale Intellectual Quotient; GAI: General Aptitude Index; \*\*  $p < .01$  with Bonferroni correction.

<sup>1</sup> Cohen's  $d$  for two independent samples comparison (Equation 1 from Lakens, 2013)

The deviations and equations for each  $IQ_{SF}$  are presented in Table 2. All of the scores from each 2-subtest and 4-subtest  $IQ_{SF}$  have skewness and kurtosis coefficient lying between -1 and 1. All of the 2- and 4-subtests forms have an average value greater than 125 in intellectually gifted children and an average value of 107 in typical children.

**Table 2: Mean (SD) of WISC-IV Short-Form Scores and formulas**

| Short Form        | Intellectually gifted children<br>(n = 117) |       |       | Typical children<br>(n = 52) |       |       | $d_s^1$ | Statistical formulas <sup>2</sup> |
|-------------------|---|-------|-------|------------------------------|-------|-------|---------|-----------------------------------|
|                   | M (SD)                                      | Skew  | Kurt  | M (SD)                       | Skew  | Kurt  |         |                                   |
| <b>2 Subtests</b> |   |       |       |                              |       |       |         |                                   |
| <b>SiMr</b>       | 132.77<br>(9.48)                            | -0.04 | -0.56 | 109.72<br>(8.16)             | -0.32 | 0.15  | 2.53**  | 3.01 x (Si+Mr) + 39.81            |
| <b>SiPc</b>       | 135.03<br>(8.83)                            | -0.34 | -0.06 | 105.87<br>(7.95)             | -0.01 | -0.77 | 3.40**  | 3.05 x (Si+Pc) + 38.92            |
| <b>SiBd</b>       | 132.12<br>(9.45)                            | 0.16  | -0.02 | 107.03<br>(10.16)            | -0.24 | -0.21 | 2.59**  | 3.02 x (Si+Bd) + 39.59            |
| <b>VoMr</b>       | 130.47<br>(9.56)                            | -0.28 | 0.06  | 109.00<br>(7.39)             | -0.58 | 0.30  | 2.40**  | 3.00 x (Vo+Mr) + 40.02            |
| <b>VoPc</b>       | 132.69<br>(8.89)                            | -0.23 | -0.40 | 105.15<br>(9.05)             | -0.15 | 0.16  | 3.08**  | 3.04 x (Vo+Pc) + 39.14            |
| <b>VoBd</b>       | 130.48<br>(9.93)                            | -0.04 | 0.31  | 106.45<br>(9.27)             | 0.13  | -0.36 | 2.47**  | 3.08 x (Vo+Bd) + 38.45            |
| <b>CoMr</b>       | 129.22<br>(10.27)                           | 0.20  | -0.22 | 107.27<br>(8.81)             | -0.62 | 0.53  | 2.23**  | 3.13 x (Co+Mr) + 37.50            |
| <b>CoPc</b>       | 130.92<br>(10.93)                           | -0.18 | -0.04 | 103.17<br>(8.71)             | -0.54 | -0.27 | 2.69**  | 3.11 x (Co+Pc) + 37.74            |
| <b>CoBd</b>       | 129.23<br>(11.97)                           | 0.29  | -0.47 | 104.57<br>(9.01)             | -0.11 | -0.25 | 2.21**  | 3.21 x (Co+Bd) + 35.72            |
| <b>4 Subtests</b> |   |       |       |                              |       |       |         |                                   |
| <b>SiVoMrPc</b>   | 136.05<br>(7.83)                            | -0.16 | -0.10 | 108.21<br>(7.21)             | -0.23 | -0.82 | 3.64**  | 1.67 x (Si+Vo+Mr+Pc) + 33.33      |
| <b>SiVoMrBd</b>   | 134.54<br>(8.08)                            | 0.09  | -0.35 | 108.85<br>(7.87)             | -0.46 | -0.53 | 3.21**  | 1.66 x (Si+Vo+Mr+Bd) + 33.55      |
| <b>SiVoPcBd</b>   | 136.40<br>(7.40)                            | 0.17  | -0.06 | 106.84<br>(7.74)             | -0.34 | -0.88 | 3.94**  | 1.70 x (Si+Vo+Pc+Bd) + 31.88      |
| <b>SiCoMrPc</b>   | 135.92<br>(8.42)                            | 0.12  | -0.10 | 107.33<br>(6.36)             | -0.52 | -0.50 | 3.64**  | 1.73 x (Si+Co+Mr+Pc) + 30.99      |
| <b>SiCoMrBd</b>   | 134.56<br>(8.67)                            | 0.22  | -0.45 | 108.05<br>(7.15)             | -0.48 | -0.69 | 3.22**  | 1.73 x (Si+Co+Mr+Bd) + 30.83      |
| <b>SiCoPcBd</b>   | 136.31<br>(8.55)                            | -0.02 | -0.29 | 105.91<br>(6.22)             | -0.75 | -0.08 | 3.84**  | 1.77 x (SI+Co+Pc+Bd) + 29.38      |
| <b>VoCoMrPc</b>   | 134.50<br>(8.73)                            | 0.09  | -0.32 | 106.90<br>(6.57)             | -0.62 | 0.23  | 3.39**  | 1.72 x (Vo+Co+Mr+Pc) + 31.32      |
| <b>VoCoMrBd</b>   | 133.38<br>(9.10)                            | 0.40  | -0.42 | 107.67<br>(6.44)             | -0.58 | -0.66 | 3.07**  | 1.73 x (Vo+Co+Mr+Bd) + 30.66      |
| <b>VoCoPcBd</b>   | 135.11<br>(9.01)                            | 0.12  | -0.39 | 105.51<br>(6.26)             | -0.72 | 0.72  | 3.58**  | 1.77 x (Vo+Co+Pc+Bd) + 29.20      |

**Note.** n = 169; Si: Similarities; Vo: Vocabulary; Co: Comprehension; Mr: Matrix Reasoning; Pc: Pictures Concept; Bd: Block Design; \*\*  $p < .01$  with Bonferroni correction.

<sup>1</sup> Cohen's  $d$  for two independent sample (Equation 1 from Lakens, 2013)

<sup>2</sup> Equation 4 from Tellgen & Briggs (1967)

### 3.2. Short form WISC-IV estimation with simulated dataset

We realized a comparison between the reliability and validity indicators from real and simulated data in WISC-IV. The composite indicator  $R_c$  calculated with our sample and the simulated dataset are highly correlated ( $r(36) = .988$ ). In addition, there are few differences between each indicator of reliability and validity estimated with our sample and these with the simulated dataset have few differences (Table 3). The near perfect duplication of psychometric quality indicators shows that their estimation with simulated data is very close to those derived from real data. We thus selected the short forms from the simulated dataset.

**Table 3. Comparison the principal indexes of reliability and validity estimated with our sample and the simulated dataset**

|                   | FSIQ    |                  |         | GAI     |                  |         | Rc      |
|-------------------|---------|------------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
|                   | $r'$    | C <sub>acc</sub> | ICC     | $r'$    | C <sub>acc</sub> | ICC     |         |
| <b>Difference</b> | -0.013  | -0.017           | 0.003   | -0.010  | 0.015            | 0.014   | -0.001  |
| <b>r</b>          | 0.906** | 0.831**          | 0.976** | 0.981** | 0.909**          | 0.974** | 0.988** |

*Note.* N = 36. \*\*  $p < .01$

The 2-subtest and 4-subtest forms are ranked by decreasing value of the composite score  $R_c$ , determined to use the reliability index and each validity index (see Table 4). All of the  $IQ_{SF}$  scores produced by the 2 subtests are significantly correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) \in [.680; .786]$ ;  $p < .01$ . All of the  $IQ_{SF}$  scores computed from 4 subtests are also correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) \in [.823; .851]$ ;  $p < .01$ . However, the forms with 4 subtests are significantly more strongly correlated with the FSIQ, respectively  $r(9e6) = .791$ ;  $r(9e6) = .885$ ; 95% CI [-.094, -.094], and the GAI, respectively  $r(9e6) = .856$ ;  $r(9e6) = .957$ ; 95% CI [-.102, -.102], than with the forms with 2 subtests

The short form with the *Similarities + Matrix Reasoning* (SiMr) subtests has the highest agreement score of all 2 subtest forms,  $R_c = .807$ . It is most strongly correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) = .786$ ;  $p < .01$ , and GAI score,  $r'(1e6) = .833$ ;  $p < .01$ . In 80% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiMr form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the FSIQ. In 91% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiMr form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the GAI.

Among the 4-subtest forms, the  $IQ_{SF}$  scores of *Similarities + Vocabulary + Matrix Reasoning + Block Design* [SiVoMrBd] form has a higher accession score,  $R_c = .885$ . It is strongly correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) = .851$ ;  $p < .01$ , and GAI score,  $r'(1e6) = .892$ ;  $p < .01$ . In 86% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiVoMrBd form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the FSIQ. In 99% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiVoMrBd form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the GAI.

**Table 4: Reliability and Validity of WISC-IV Short Forms from simulated data**

| Short Form        | $r_{cc}$     | $\omega_H$   | FSIQ         |              |              | GAI          |              |              | $R_c$        |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                   |              |              | $r'$         | ICC          | $C_{acc}$    | $r'$         | ICC          | $C_{acc}$    |              |
| <b>2 subtests</b> |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| SiMr              | <b>0.877</b> | <b>0.550</b> | <b>0.786</b> | <b>0.820</b> | 0.797        | <b>0.833</b> | <b>0.882</b> | <b>0.909</b> | <b>0.807</b> |
| VoMr              | <b>0.871</b> | <b>0.561</b> | <b>0.783</b> | <b>0.818</b> | 0.804        | <b>0.826</b> | <b>0.877</b> | 0.907        | <b>0.806</b> |
| VoBd              | 0.845        | 0.484        | <b>0.771</b> | <b>0.813</b> | <b>0.828</b> | <b>0.801</b> | 0.862        | 0.907        | <b>0.789</b> |
| SiBd              | <b>0.858</b> | <b>0.540</b> | 0.759        | 0.797        | 0.791        | 0.791        | 0.848        | 0.872        | 0.782        |
| SiPc              | 0.825        | 0.507        | 0.741        | 0.788        | 0.813        | 0.795        | <b>0.864</b> | <b>0.919</b> | 0.781        |
| VoPc              | 0.819        | 0.518        | 0.737        | 0.786        | <b>0.818</b> | 0.788        | 0.860        | <b>0.918</b> | 0.781        |
| CoMr              | 0.836        | 0.437        | 0.741        | 0.784        | 0.795        | 0.790        | 0.853        | 0.897        | 0.767        |
| CoBd              | 0.806        | 0.347        | 0.729        | 0.779        | <b>0.820</b> | 0.765        | 0.837        | 0.898        | 0.748        |
| CoPc              | 0.787        | 0.449        | 0.680        | 0.736        | 0.786        | 0.737        | 0.819        | 0.882        | 0.734        |
| <b>4 subtests</b> |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| SiVoMrBd          | <b>0.917</b> | <b>0.733</b> | <b>0.851</b> | <b>0.891</b> | 0.856        | <b>0.892</b> | 0.952        | 0.987        | <b>0.885</b> |
| SiVoPcBd          | 0.898        | <b>0.723</b> | 0.840        | 0.889        | 0.874        | 0.887        | 0.959        | 0.996        | <b>0.883</b> |
| SiVoMrPc          | <b>0.908</b> | <b>0.733</b> | 0.839        | 0.884        | 0.851        | <b>0.893</b> | <b>0.959</b> | 0.994        | <b>0.883</b> |
| VoCoMrBd          | 0.900        | 0.684        | <b>0.845</b> | <b>0.893</b> | <b>0.879</b> | 0.889        | 0.958        | 0.995        | 0.881        |
| SiCoMrBd          | <b>0.903</b> | 0.692        | <b>0.844</b> | <b>0.890</b> | 0.871        | <b>0.890</b> | 0.957        | 0.994        | 0.880        |
| VoCoPcBd          | 0.880        | 0.672        | 0.830        | 0.886        | <b>0.888</b> | 0.879        | <b>0.961</b> | <b>0.998</b> | 0.874        |
| SiCoMrPc          | 0.894        | 0.694        | 0.827        | 0.878        | 0.855        | 0.885        | 0.959        | <b>0.996</b> | 0.874        |
| SiCoPcBd          | 0.883        | 0.677        | 0.829        | 0.883        | <b>0.881</b> | 0.880        | <b>0.959</b> | <b>0.997</b> | 0.873        |
| VoCoMrPc          | 0.893        | 0.700        | 0.823        | 0.874        | 0.852        | 0.879        | 0.954        | 0.993        | 0.871        |

*Note.* N = 1,000,000. Si: Similarities; Vo: Vocabulary; Co: Comprehension; Mr: Matrix Reasoning; Pc: Pictures Concept; Bd: Block Design. Boldfaced values highlight the top three short-forms according to each psychometric measure. All corrected correlation coefficient ( $r'$ ) are significant at  $p < .01$ .

### 3.3. Identification efficiency of short-form WISC-IV from empirical data

After selecting the three best short forms with 2- and 4-subtests from simulated dataset, we realised the AUC, sensitivity and sensibility of the three best  $IQ_{SF}$  from empirical dataset. In table 5, the short forms with 2 subtests and 4 subtests are ranked in descending order of the AUC indicating the predictive performance in identifying the IGC. All short form scales have



a high AUCs suggesting a highly predictive performance with 2- and 4-subtests models. The difference among all models is low ( $\Delta$ AUCs < 0.05).

Among the forms with 2 subtests, the form with the best performance is still *Similarities + Matrix Reasoning* [SiMr]. They allow more than 74% of IGC in our sample to be correctly identified. The SiMr form has the probability of around 1,1% typical children being incorrectly identified as gifted. It has only significant difference with GAI,  $t(168) = -3.903$ ,  $p < .01$ ,  $d_{rm} = -0.156$ , but it has the smallest effect size among the three best 2-subtests short forms.

Among the forms comprising 4 subtests, the IQ<sub>SF</sub> with the best performance consisted of the *Similarities + Vocabulary + Picture Concept + Block Design* [SiVoPcBd] subtests. It correctly identifies more than 96% of IGC in our sample. No typical children were identified as being gifted, but 4.3% IGC from our sample have not been correctly identified. It has only a significant difference with FSIQ,  $t(168) = -3.053$ ,  $p < .05$ ,  $d_{rm} = -0.109$ .

**Table 5: Performance analysis of three best 2- and 4-subtests WISC-IV short-forms.**

| ShortForm         | Ske<br>w | Kurt  | FSIQ        |                                    | GAI            |                                    | IQ <sub>SF</sub> ≥ 125 |              |              |              |              |
|-------------------|----------|-------|-------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                   |          |       | <i>t</i>    | <i>d<sub>rm</sub></i> <sup>1</sup> | <i>t</i>       | <i>d<sub>rm</sub></i> <sup>1</sup> | AUC                    | Sensitivity  | Specificity  | FPR          | FNR          |
| <b>2 Subtests</b> |          |       |             |                                    |                |                                    |                        |              |              |              |              |
| <b>SiMr</b>       | -0.27    | -0.58 | <b>0.21</b> | <b>0.01</b>                        | <b>-3.90**</b> | <b>-0.17</b>                       | <b>0.970</b>           | <b>0.744</b> | <b>0.981</b> | <b>0.019</b> | <b>0.256</b> |
| <b>VoMr</b>       | -0.23    | -0.60 | -2.25*      | -0.10                              | -7.10**        | -0.28                              | 0.962                  | 0.718        | 0.981        | 0.019        | 0.282        |
| <b>VoBd</b>       | -0.29    | -0.52 | -3.22**     | -0.15                              | -8.30**        | -0.32                              | 0.958                  | 0.675        | 0.962        | 0.038        | 0.325        |
| <b>4 Subtests</b> |          |       |             |                                    |                |                                    |                        |              |              |              |              |
| <b>SiVoPcBd</b>   | -0.33    | -0.68 | 3.05*       | 0.11                               | -2.37          | -0.04                              | <b>0.999</b>           | <b>0.957</b> | <b>1.000</b> | <b>0.000</b> | <b>0.043</b> |
| <b>SiVoMrPc</b>   | -0.18    | -0.68 | 3.24**      | 0.12                               | <b>-1.49</b>   | <b>-0.03</b>                       | 0.996                  | 0.906        | 1.000        | 0.000        | 0.094        |
| <b>SiVoMrBd</b>   | -0.46    | -0.54 | <b>1.93</b> | <b>0.07</b>                        | -3.73**        | -0.09                              | 0.994                  | 0.880        | 1.000        | 0.000        | 0.120        |

**Note.** N = 169. Si: Similarities; Vo: Vocabulary; Co: Comprehension; Mr: Matrix Reasoning; Bd: Block Design. AUC: Area Under Curve; FPR: False Positive Rate; FNR: False Negative Rate; Boldfaced values highlight the top of short-forms according to each psychometric measure. \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$

<sup>1</sup> Cohen's d for correlated samples comparison (Equation 9 from Lakens, 2013)

### 3.4. Short-Form WISC-V Estimation from simulated dataset

The 2-subtest and 4-subtest forms are ranked by decreasing value of the composite score  $R_c$  (see Table 6). All of the  $IQ_{SF}$  scores produced by the 2 subtests are significantly correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) \in [.741; .833]$ ;  $p < .01$ . All of the  $IQ_{SF}$  scores computed from 4 subtests are also correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) \in [.921; .940]$ ;  $p < .01$ .

Like at the WISC-IV, the short form with the *Similarities + Matrix Reasoning* [SiMr] subtests has the highest agreement score of all 2 subtest forms,  $R_c = .849$ . It is strongly correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) = .833$ ;  $p < .01$ , and GAI score,  $r'(1e6) = .855$ ;  $p < .01$ . In 87% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiMr form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the FSIQ. In 92% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiMr form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the GAI.

Like at the WISC-IV, the *Similarities + Vocabulary + Matrix Reasoning + Block Design* [SiVoMrBd] form has a high agreement score,  $R_c = .923$ . It is strongly correlated with the FSIQ,  $r'(1e6) = .898$ ;  $p < .01$ , and GAI score,  $r'(1e6) = .917$ ;  $p < .01$ . In 95% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiVoMrBd form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the FSIQ. In 99.8% of cases, the  $IQ_{SF}$  score for the SiVoMrBd form correctly identifies the IGC in our sample, and their  $IQ_{SF}$  lie within 2 standard errors of measurement of the GAI.

**Table 6: Reliability and Validity of WISC-V Short Forms from simulated data**

| Short Form        | Statistical formulas <sup>1</sup> | $r_{cc}$     | $\omega_H$   | FSIQ         |              |              | GAI          |              |              | $R_c$        |
|-------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                   |                                   |              |              | $r'$         | ICC          | $C_{acc}$    | $r'$         | ICC          | $C_{acc}$    |              |
| <b>2 subtests</b> |                                   |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| <b>SiMr</b>       | 2.91 x (Si+Mr) + 41.88            | 0.885        | <b>0.648</b> | <b>0.833</b> | <b>0.874</b> | <b>0.866</b> | <b>0.855</b> | <b>0.907</b> | <b>0.922</b> | <b>0.849</b> |
| <b>SiBd</b>       | 2.95 x (Si+Bd) + 41.07            | 0.875        | <b>0.611</b> | <b>0.826</b> | <b>0.870</b> | <b>0.870</b> | 0.840        | 0.896        | <b>0.913</b> | <b>0.838</b> |
| <b>SiFw</b>       | 2.93 x (Si+Fw) + 41.48            | <b>0.911</b> | <b>0.630</b> | <b>0.829</b> | 0.861        | 0.804        | <b>0.861</b> | <b>0.901</b> | 0.880        | <b>0.835</b> |
| <b>VoMr</b>       | 2.99 x (Vo+Mr) + 40.24            | 0.882        | 0.571        | 0.826        | <b>0.866</b> | 0.856        | <b>0.849</b> | <b>0.901</b> | <b>0.914</b> | 0.833        |
| <b>VoBd</b>       | 3.03 x (Vo+Bd) + 39.37            | 0.871        | 0.529        | 0.819        | 0.863        | <b>0.863</b> | 0.834        | 0.89         | 0.904        | 0.822        |
| <b>VoFw</b>       | 2.97 x (Vo+Fw) + 40.66            | <b>0.912</b> | 0.591        | 0.810        | 0.841        | 0.766        | 0.843        | 0.882        | 0.836        | 0.810        |
| <b>CoMr</b>       | 2.99 x (Co+Mr) + 40.24            | 0.868        | 0.571        | 0.741        | 0.786        | 0.744        | 0.735        | 0.793        | 0.753        | 0.749        |
| <b>CoBd</b>       | 3.10 x (Co+Bd) + 37.98            | 0.850        | 0.461        | 0.750        | 0.799        | 0.785        | 0.734        | 0.798        | 0.784        | 0.745        |
| <b>CoFw</b>       | 3.05 x (Co+Fw) + 38.92            | <b>0.892</b> | 0.507        | 0.747        | 0.784        | 0.707        | 0.751        | 0.798        | 0.724        | 0.739        |
| <b>4 subtests</b> |                                   |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| <b>SiVoMrBd</b>   | 1.61 x (Si+Vo+Mr+Bd) + 35.52      | 0.928        | <b>0.773</b> | <b>0.898</b> | <b>0.943</b> | <b>0.948</b> | <b>0.917</b> | <b>0.976</b> | <b>0.998</b> | <b>0.923</b> |
| <b>SiVoFwBd</b>   | 1.63 x (Si+Vo+Fw+Bd) + 34.97      | <b>0.936</b> | <b>0.767</b> | <b>0.900</b> | <b>0.941</b> | <b>0.934</b> | <b>0.925</b> | <b>0.978</b> | <b>0.999</b> | <b>0.922</b> |
| <b>SiVoMrFw</b>   | 1.60 x (Si+Vo+Mr+Fw) + 35.98      | <b>0.940</b> | <b>0.782</b> | <b>0.896</b> | <b>0.935</b> | <b>0.911</b> | <b>0.925</b> | <b>0.975</b> | <b>0.997</b> | <b>0.920</b> |
| <b>SiCoFwBd</b>   | 1.67 x (Si+Co+Fw+Bd) + 33.18      | 0.927        | 0.741        | 0.877        | 0.922        | 0.906        | 0.887        | 0.944        | 0.959        | 0.895        |
| <b>SiCoMrBd</b>   | 1.64 x (Si+Co+Mr+Bd) + 34.35      | 0.921        | 0.762        | 0.867        | 0.917        | 0.902        | 0.871        | 0.935        | 0.944        | 0.890        |
| <b>SiCoMrFw</b>   | 1.63 x (Si+Co+Mr+Fw) + 34.70      | <b>0.933</b> | 0.767        | 0.867        | 0.909        | 0.869        | 0.881        | 0.936        | 0.934        | 0.887        |
| <b>VoCoFwBd</b>   | 1.68 x (Vo+Co+Fw+Bd) + 32.66      | 0.927        | 0.723        | 0.867        | 0.911        | 0.884        | 0.877        | 0.934        | 0.937        | 0.883        |
| <b>VoCoMrBd</b>   | 1.66 x (Vo+Co+Mr+Bd) + 33.55      | 0.921        | 0.740        | 0.860        | 0.910        | 0.890        | 0.865        | 0.929        | 0.930        | 0.881        |
| <b>VoCoMrFw</b>   | 1.64 x (Vo+Co+Mr+Fw) + 34.20      | 0.933        | 0.753        | 0.857        | 0.899        | 0.846        | 0.871        | 0.926        | 0.910        | 0.874        |

*Note.* N = 1,000,000. Si: Similarities; Vo: Vocabulary; Co: Comprehension; Mr: Matrix Reasoning; Fw: Figure Weights; Bd: Block Design. Boldfaced values highlight the top three short-forms according to each psychometric measure. All corrected correlation coefficient ( $r'$ ) are significant at  $p < .01$ .

<sup>1</sup> Equation 4 from Tellgen & Briggs (1967)

#### 4. Discussion

Our aim was to make a short form of the recent versions of Wechsler scales, allowing an intellectual capacity assessment in less than 30 minutes. In the literature, short forms with 2 or 4 subtests are often used to estimate intellectual capacity. We thus tested all possible short form combinations, comprising either 2 or 4 subtests used for the evaluation of high-level cognitive abilities.

The results of the present study indicate that the estimation of reliability and validity indicators with simulated data are very close to them estimated with real data. Our findings also show the short forms of the WISC-IV can have high performance to identify children on having intellectual giftedness. The 4-subtest forms appear to produce better psychometric results than the 2-subtest forms. In addition, the 4-subtest short forms appear to provide a good compromise between test duration and psychometric qualities, which are more satisfactory than those obtained with 2-subtest forms. The  $\omega_H$  coefficient also showed that the general factor explained more variance in the 4-subtest than 2-subtest forms. The 4-subtest forms seemed to be a satisfactory trade-off between an accurate estimation of overall cognitive aptitude and administration time (Gignac, 2015).

In spite of a number changes, our results show that the 4-subtest form *Similarities + Vocabulary + Matrix Reasoning + Block Design* [SiVoMrBd], in the WISC-IV and WISC-V, is globally efficient in the identification of IGC. It appears to evaluate the three most discriminating cognitive abilities in the identification of IGC, i.e. Knowledge-Comprehension, Fluid reasoning and Visual processing (Volker et al., 2006). Moreover, the composite score using the *Similarities* and *Matrix Reasoning* (SiMr) subtests, in the two recent Wechsler scale, appears to provide one of the best 2-subtest forms for the identification

of IGC. These two types of short form thus appear to provide acceptable means of identification, for the selection of candidates for complementary evaluations (Prewett, 1995).

In the context of learning disabilities, an abbreviated intellectual assessment using *Similarities*, *Vocabulary*, *Matrix Reasoning* and *Block Design* subtests can allow clinician psychologists to be less biased an overall cognitive aptitude estimation. Indeed, these subtests seem to be less affected by the specific learning disabilities (e.g. Toffalini, Giofrè, & Cornoldi, 2017; Toffalini, Pezzuti, & Cornoldi, 2017). The time gain allows us to add another cognitive assessments such as the complex span tasks to assess working memory capacity (e.g. Gonthier, Aubry & Bourdin, 2017).

The Gc, Gf and Gv abilities evaluated by the subtests of the GAI score appear to provide the best discrimination in the identification of IGC. This is based on the idea that these cognitive abilities appear to be the characteristics of high intellectual potential (Margulies & Floyd, 2009). Thus, psychologists should choose measurements that are well adapted to characteristics that are related to intellectual giftedness (Pierson et al., 2012).

Our results reveal the importance of relying on a theoretical model of cognitive ability, with the aim of identifying IGC as a CHC model. In addition, this theoretical model can be very helpful for the schooling of children in general (Aubry & Bourdin, 2016) and IGC in particular (Warne, 2016).

Any decision in this respect should not be made solely on the basis of the composite score from the short form. It is also important to recognise the reality of measurement errors, which can prevent the correct identification of IGC (Pierson et al., 2012). It is thus recommended to implement a multidimensional evaluation of IGC's characteristics (McClain & Pfeiffer, 2012).

We have shown that some short forms have satisfactory psychometric qualities. However, they have to be accompanied by other assessments such as a teacher rating scale, such as the Gifted Rating Scales–School Form (GRS; Pfeiffer & Jarosewich, 2003) in order to improve the quality of IGC identification (McBee et al., 2013; McBee, Peters & Miller, 2016). Short measurements appear to be reasonable tools for the prediction of global scores of complete batteries of tests, for the identification of children with intellectual giftedness (Newton, McIntosh, Dixon, Williams & Youman, 2008).

## **5. Limitations of our study**

Our simulation of data is very close to our empirical data. However, their relation is not perfect. So, it may have some difference with empirical data for WISC-V short forms. In terms of future perspectives, it would be interesting to implement a detailed analysis of the specificity and sensitivity of each short form of WISC-V identified as being reliable and valid for the identification of IGC.

Among the limitations of our study, the relatively small number of typical children in our sample means that our results must be considered with caution. We tried to estimate the AUC, sensitivity and specificity of all short forms scale.

## **6. Conclusion**

The identification of IGC based on the use of standardised tests such as the Wechsler scale is often time-consuming. This drawback can prevent other evaluations from being made, which could be essential for the education of these children with specific needs. The development of a short form of the recent version of Wechsler scale is thus useful for the fast and efficient identification of IGC. This short form would then allow the need for a more in-depth evaluation of various cognitive and socioemotional characteristics to be determined.

Our study evaluated nine 2-subtest forms and nine 4-subtest forms, based on the linear method of Tellegen & Briggs (1967). In order to evaluate these different short forms, we computed with simulated datasets several psychometric indicators that were reorganised into groups with an agreement indicator for FSIQ and GAI scores. We also computed the AUC, sensibility and specificity, on the basis of the 117 IGC and 52 typical children in our sample.

Our results show that the 4-subtest short form at the WISC-IV and WISC-V, *Similarities + Vocabulary + Matrix Reasoning + Block Design* [SiVoMrBd], appears to be one of the most reliable forms for the identification of IGC. Among the 2-subtest forms at the WISC-IV and WISC-V, the *Similarities + Matrix Reasoning* [SiMr] version appears to ensure an optimal compromise between reliability and accuracy, for the estimation of FSIQ and GAI scores. In the case of our sample, this outcome led us to question the usefulness of relying on a theory of cognitive aptitudes such as that of the CHC model, in order to determine the specific cognitive characteristics of IGC. We are of the opinion that the elaboration of a short form should take these specific cognitive characteristics into account, in order to obtain sufficiently accurate identification of IGC.

## **7. Acknowledgements**

First and foremost, we extend our thanks to the children and families who participated in our study. The authors also extend their warm thanks to Claire Touchet, Corentin Gonthier, Émilie Lacot, Geoffrey Blondelle, Yannick Gounden and Marc Chatterji for their advice and their proofreading of this paper. The authors thank also Académie de Versailles, Florence Pâris, Philippe Coche, Isabelle Sage and Éric Turon-Lagot for your help. The authors also want to thank the two anonymous reviewers for their suggestions to improve this article.

This research was supported by the European Regional Development Fund (ERDF) and the Regional Council of Haut de France for the "HPISCOL" project: *Enfants et adolescents à haut potentiel: Identification et scolarisation*".

## **8. Supplementary material**

The Supplementary Material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2018.00830/full#supplementary-material>



## 9. References

- Alloway, T. P., & Elsworth, M. (2012). An investigation of cognitive skills and behavior in high ability students. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 891–895. doi:10.1016/j.lindif.2012.02.001
- Assouline, S. G., Foley-Nicpon, M., & Whiteman, C. (2010). Cognitive and Psychosocial Characteristics of Gifted Students With Written Language Disability. *Gifted Child Quarterly*, 54(2), 102–115. doi:10.1177/0016986209355974
- Aubry, A. & Bourdin, B. (2016). Les tests BV9 et B53 peuvent-ils prédire la réussite scolaire ?, [Can the B53 and BV9 tests predict the academic achievement?]. *L'orientation scolaire et professionnelle*, 45/3 | 2016. doi:10.4000/osp.5070
- Brasseur, S., & Grégoire, J. (2010). L'intelligence émotionnelle – trait chez les adolescents à haut potentiel : spécificités et liens avec la réussite scolaire et les compétences sociales [Trait emotional intelligence in adolescents with high potential: specificities and links with academic achievement and social competences]. *Enfance*, 2010(1), 59–76. doi:10.4074/S0013754510001060
- Carman, C. A. (2013). Comparing Apples and Oranges: Fifteen Years of Definitions of Giftedness in Research. *Journal of Advanced Academics*, 24(1), 52–70. doi:10.1177/1932202X12472602
- Calero, M. D., García-Martín, M. B., Jiménez, M. I., Kazén, M., & Araque, A. (2007). Self-regulation advantage for high-IQ children: Findings from a research study. *Learning and Individual Differences*, 17(4), 328–343. doi:10.1016/j.lindif.2007.03.012
- Cornoldi, C., Giofrè, D., Orsini, A., & Pezzuti, L. (2014). Differences in the intellectual profile of children with intellectual vs. learning disability. *Research in Developmental Disabilities*, 35(9), 2224–2230. doi:10.1016/j.ridd.2014.05.013
- Crawford, J. R., Anderson, V., Rankin, P. M., & MacDonald, J. (2010). An index-based short form of the WISC-IV with accompanying analysis of the reliability and abnormality of differences. *British Journal of Clinical Psychology*, 49(2), 235–258. doi:10.1348/014466509X455470
- Dasi, C., Soler, M. J., Bellver, V., & Ruiz, J. C. (2014). Short form of Spanish version of the WISC-IV for intelligence assessment in elementary school children. *Psychological Reports*, 115(3), 784–793. doi:10.2466/03.PR0.115c32z7
- Denney, D. A., Ringe, W. K., & Lacritz, L. H. (2015). Dyadic short forms of the Wechsler Adult Intelligence Scale-IV. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 30(5), 404–412. doi:10.1093/arclin/acv035
- Diedenhofen, B., & Musch, J. (2015). cocor: A Comprehensive Solution for the Statistical Comparison of Correlations. *PLoS ONE*, 10(4).doi:10.1371/journal.pone.0121945
- Dirks, J., Wessels, K., Quarfoth, J., & Quenon, B. (1980). Can short-form WISC-R IQ tests identify children with high full scale IQ? *Psychology in the Schools*, 17(1), 40–46. doi:10.1002/1520-6807(198001)17:1<40::AID-PITS2310170109>3.0.CO;2-#
- Donders, J., Elzinga, B., Kuipers, D., Helder, E., & Crawford, J. R. (2013). Development of an eight-subtest short form of the WISC-IV and evaluation of its clinical utility in

- children with traumatic brain injury. *Child Neuropsychology*, 19(6), 662–670. doi: 10.1080/09297049.2012.723681
- Doppelt, J. E. (1956). Estimating the full scale score on the Wechsler Adult Intelligence Scale from scores on four subjects. *Journal of Consulting Psychology*, 20(1), 63–66. doi: 10.1037/h0044293
- Evers, A., Muñiz, J., Bartram, D., Boben, D., Egeland, J., Fernández-Hermida, J. R., et al. (2012). Testing Practices in the 21st Century. *European Psychologist*, 17(4), 300–319. doi:10.1027/1016-9040/a000102
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. doi:10.1016/j.patrec.2005.10.010
- Flanagan, D. P., & Kaufman, A. S. (2009). *Essentials of WISC-IV assessment* (2nd Ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Fiorello, C. A., Hale, J. B., McGrath, M., Ryan, K., & Quinn, S. (2001). IQ interpretation for children with flat and variable test profiles. *Learning and Individual Differences*, 13(2), 115–125. doi:10.1016/S1041-6080(02)00075-4
- Genz, A., Bretz, F., Miwa, T., Mi, X., Leisch, F., Scheipl, F., & Hothorn, T. (2018). *Multivariate Normal and t Distributions*. Retrieved from <http://mvtnorm.r-forge.r-project.org>
- Girard, T. A., Axelrod, B. N., Patel, R., & Crawford, J. R. (2015). Wechsler Adult Intelligence Scale-IV Dyads for Estimating Global Intelligence. *Assessment*, 22(4), 441–448. doi: 10.1177/1073191114551551
- Girard, T. A., Axelrod, B. N., & Wilkins, L. K. (2010). Comparison of WAIS-III Short Forms for Measuring Index and Full-Scale Scores. *Assessment*, 17(3), 400–405. doi: 10.1177/1073191110369763
- Girard, T. A., & Christensen, B. K. (2008). Clarifying problems and offering solutions for correlated error when assessing the validity of selected-subtest short forms. *Psychological Assessment*, 20(1), 76–80. doi:10.1037/1040-3590.20.1.76
- Giofrè, D., Toffalini, E., Altoè, G., & Cornoldi, C. (2017). Intelligence measures as diagnostic tools for children with specific learning disabilities. *Intelligence*, 61, 140–145. doi: 10.1016/j.intell.2017.01.014
- Golay, P., Reverte, I., Rossier, J., Favez, N., & Lecerf, T. (2013). Further insights on the French WISC-IV factor structure through Bayesian structural equation modeling. *Psychological Assessment*, 25(2), 496–508. doi:10.1037/a0030676
- Gonthier, C., Aubry, A., & Bourdin, B. (2017). Measuring working memory capacity in children using adaptive tasks: Example validation of an adaptive complex span. *Behavior Research Methods*, 27(8), 1–12. doi:10.3758/s13428-017-0916-4
- Grégoire, J. (2009). *L'examen clinique de l'intelligence de l'enfant : fondements et pratique du WISC-IV* (2nd Ed.). Editions Mardaga.
- Hale, J. B., Fiorello, C. A., Kavanagh, J. A., Holdnack, J. A., & Aloe, A. M. (2007). Is the demise of IQ interpretation justified? A response to special issue authors. *Applied Neuropsychology*, 14(1), 37–51. doi:10.1080/09084280701280445

- Hoard, M. K., Geary, D. C., Byrd-Craven, J., & Nugent, L. (2008). Mathematical Cognition in Intellectually Precocious First Graders. *Developmental Neuropsychology*, *33*(3), 251–276. doi:10.1080/87565640801982338
- Hrabok, M., Brooks, B. L., Fay-McClymont, T. B., & Sherman, E. M. S. (2012). Wechsler Intelligence Scale for Children-Fourth Edition (WISC-IV) short-form validity: A comparison study in pediatric epilepsy. *Child Neuropsychology*, *20*(1), 49–59. doi:10.1080/09297049.2012.741225
- Karnes, F. A., & Brown, K. E. (1981). A short form of the WISC-R for gifted students. *Psychology in the Schools*, *18*(2), 169–173. doi:10.1002/1520-6807(198104)18:2<169::AID-PITS2310180210>3.0.CO;2-N
- Kelley, K. (2018). MBESS (Version 4.4.3) [Computer Software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=MBESS>
- Kelley, K., & Pornprasertmanit, S. (2016). Confidence intervals for population reliability coefficients: Evaluation of methods, recommendations, and software for composite measures. *Psychological Methods*, *21*(1), 69–92. doi:10.1037/a0040086
- Keith, T. Z., Fine, J. G., Taub, G. E., Reynolds, M. R., & Kranzler, J. H. (2006). Higher Order, Multisample, Confirmatory Factor Analysis of the Wechsler Intelligence Scale for Children - Fourth Edition: What Does It Measure? *School Psychology Review*, *35*(1), 108–127. Retrieved from <http://eric.ed.gov/?id=EJ788234>
- Killan, J. B., & Hughes, L. C. (1978). A Comparison of Short Forms of the Intelligence Scale for Children - Revised in the Screening of Gifted Referrals. *Gifted Child Quarterly*, *22*(1), 111–115. doi:10.1177/001698627802200123
- Kieng, S., Rossier, J., Favez, N., & Lecerf, T. (2013). Étude exploratoire de la stabilité à long terme des indices standard du WISC-IV [Exploratory study about long-term stability of French WISC-IV index scores]. *Pratiques Psychologiques*, *19*(3), 163–178. doi:10.1016/j.prps.2013.07.003
- Kroesbergen, E. H., van Hooijdonk, M., van Viersen, S., Middel-Lalleman, M. M. N., & Reijnders, J. J. W. (2016). The Psychological Well-Being of Early Identified Gifted Children. *Gifted Child Quarterly*, *60*(1), 16–30. doi:10.1177/0016986215609113
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*. doi:10.3389/fpsyg.2013.00863
- Lecerf, T., Bovet-Boone, F., Peiffer, E., Kieng, S., & Geistlich, S. (2016). WISC-IV GAI and CPI profiles in healthy children and children with learning disabilities. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 1–7. doi:10.1016/j.erap.2016.04.001
- Lecerf, T., Kieng, S., & Geistlich, S. (2015). Cohésion–non-cohésion des scores composites : valeurs seuils et interprétabilité. L'exemple du WISC-IV [Cohesive vs. non cohesive composite scores: Cut-off values and interpretability. The example of the WISC-IV]. *Pratiques Psychologiques*, *21*(2), 155-171. doi:10.1016/j.prps.2015.02.001
- Lecerf, T., Reverte, I., Coleaux, L., Favez, N., & Rossier, J. (2010). Indice d'Aptitude Général pour le WISC-IV: Normes francophones [General ability index for the WISC-IV:

- French norms]. *Pratiques Psychologiques*, 16(1), 109–121. DOI:10.1016/j.prps.2009.04.001
- Lecerf, T., Rossier, J., Favez, N., Reverte, I., & Coleaux, L. (2010). The Four- vs. Alternative Six-Factor Structure of the French WISC-IV. *Swiss Journal of Psychology*, 69(4), 221–232. doi:10.1024/1421-0185/a000026
- Levy, P. (1967). The correction for spurious correlation in the evaluation of short-form tests. *Journal of Clinical Psychology*, 23(1), 84–86. doi:10.1002/1097-4679(196701)23:1<84::AID-JCLP2270230123>3.0.CO;2-2
- Levy, P. (1968). Short-Form Tests: A Methodological Review. *Psychological Bulletin*, 69(6), 410–416. doi:10.1037/h0025736
- Litster, K., & Roberts, J. (2011). The self-concepts and perceived competencies of gifted and non-gifted students: a meta-analysis. *Journal of Research in Special Educational Needs*, 11(2), 130–140. doi:10.1111/j.1471-3802.2010.01166.x
- Lovett, B. J., & Lewandowski, L. J. (2006). Gifted students with learning disabilities: who are they? *Journal of Learning Disabilities*, 39(6), 515–527. doi:10.1177/0022219406039006040
- Maehler, C., & Schuchardt, K. (2009). Working memory functioning in children with learning disabilities: does intelligence make a difference? *Journal of Intellectual Disability Research*, 53(1), 3–10. doi:10.1111/j.1365-2788.2008.01105.x
- Margulies, A. S., & Floyd, R. G. (2009). A Preliminary Examination of the CHC Cognitive Ability Profiles of Children with High IQ and High Academic Achievement Enrolled in Services for Intellectual Giftedness. *Woodcock Munoz Foundation Press*, 1, 1–12.
- Mark, R., Beal, A. L., & Dumont, R. (1998). Validation of a WISC-III Short-Form for the Identification of Canadian Gifted Students. *Canadian Journal of School Psychology*, 14(1), 1–10. doi:10.1177/082957359801400101
- McBee, M. T., Peters, S. J., & Miller, E. M. (2016). The Impact of the Nomination Stage on Gifted Program Identification A Comprehensive Psychometric Analysis. *Gifted Child Quarterly*. doi:10.1177/0016986216656256
- McBee, M. T., Peters, S. J., & Waterman, C. (2013). Combining Scores in Multiple-Criteria Assessment Systems: The Impact of Combination Rule. *Gifted Child Quarterly*, 58(1), 69–89. doi:10.1177/0016986213513794
- McClain, M.-C., & Pfeiffer, S. (2012). Identification of Gifted Students in the United States Today: A Look at State Definitions, Policies, and Practices. *Journal of Applied School Psychology*, 28(1), 59–88. doi:10.1080/15377903.2012.643757
- McGraw, K. O., & Wong, S. P. (1996). Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. *Psychological Methods*, 1(1), 30–46. doi:10.1037/1082-989X.1.1.30
- McIntosh, D. E., Dixon, F. A., & Pierson, É. E. (2005). Use of intelligence tests in the identification of giftedness. In P. L. Harrison & D. P. Flanagan (Eds.), *Contemporary Intellectual Assessment* (2nd ed., pp. 504–520). New York: Guilford Press.
- McKenzie, K., Murray, A. L., Murray, K. R., & Murray, G. C. (2013). Assessing the accuracy of the WISC-IV seven-subtest short form and the child and adolescent intellectual

- disability screening questionnaire in identifying intellectual disability in children. *Child Neuropsychology*, 20(3), 372–377. doi:10.1080/09297049.2013.799642
- Meyers, J. E., Zellinger, M. M., Kockler, T., Wagner, M., & Miller, R. M. (2013). A Validated Seven-Subtest Short Form for the WAIS-IV. *Applied Neuropsychology: Adult*, 20(4), 249–256. doi:10.1080/09084282.2012.710180
- Murray, A. L., McKenzie, K., & Murray, G. C. (2016). An evaluation of the performance of the WISC-IV eight-subtest short form with children who may have an intellectual disability. *Journal of Intellectual and Developmental Disability*, 41(1), 50–53. doi:10.3109/13668250.2015.1084611
- Neihart, M. (1999). The impact of giftedness on psychological well-being: What does the empirical literature say? *Roepers Review*, 22(1), 10–17. doi:10.1080/02783199909553991
- Newman, T. M., Sparrow, S. S., & Pfeiffer, S. I. (2008). The use of the WISC-IV in assessment and intervention planning for children who are gifted. In A. Prifitera, D. H. Saklofske, & L. G. Weiss (Eds.), *WISC-IV. Clinical assessment and intervention*. (2e ed., pp. 217–242). San Diego: Academic Press.
- Newton, J. H., McIntosh, D. E., Dixon, F., Williams, T., & Youman, E. (2008). Assessing giftedness in children: Comparing the accuracy of three shortened measures of Intelligence to the Stanford–Binet Intelligence Scales, Fifth Edition. *Psychology in the Schools*, 45(6), 523–536. doi:10.1002/pits.20321
- Ortiz, V. Z., & Gonzalez, A. (1989). Validation of a Short Form of the WISC-R with Accelerated and Gifted Hispanic Students. *Gifted Child Quarterly*, 33(4), 152–155. doi:10.1177/001698628903300405
- Pierson, É. E., Kilmer, L. M., Rothlisberg, B. A., & McIntosh, D. E. (2012). Use of Brief Intelligence Tests in the Identification of Giftedness. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 30(1), 10–24. doi:10.1177/0734282911428193
- Pfeiffer, S. I., & Jarosewich, T. (2003). *Gifted Rating Scales* (3rd ed.). San Antonio, TX: Pearson.
- Prewett, P. N. (1995). A comparison of two screening tests (the Matrix Analogies Test—Short Form and the Kaufman Brief Intelligence Test) with the WISC-III. *Psychological Assessment*, 1(1), 69–72. doi:10.1037/1040-3590.7.1.69
- R Core Team (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Reiter, B. A. (2004). The Application of a WISC-III Short Form for Screening Gifted Elementary Students in Canada. *Canadian Journal of School Psychology*, 19(1-2), 191–203. doi:10.1177/082957350401900110
- Reynolds, M. R., & Keith, T. Z. (2017). Multi-group and hierarchical confirmatory factor analysis of the Wechsler Intelligence Scale for Children—Fifth Edition: What does it measure? *Intelligence*, 62(C), 31–47. doi:10.1016/j.intell.2017.02.005
- Reverte, I., Golay, P., Favez, N., Rossier, J., & Lecerf, T. (2015). Testing for multigroup invariance of the WISC-IV structure across France and Switzerland: Standard and CHC

- models. *Learning and Individual Differences*, 40(C), 127–133. doi:10.1016/j.lindif.2015.03.015
- Rinn, A. N., & Bishop, J. (2015). Gifted Adults: A Systematic Review and Analysis of the Literature. *Gifted Child Quarterly*, 59(4), 213–235. doi:10.1177/0016986215600795
- Rowe, E. W., Kingsley, J. M., & Thompson, D. F. (2010). Predictive ability of the General Ability Index (GAI) versus the Full Scale IQ among gifted referrals. *School Psychology Quarterly*, 25(2), 119–128. doi:10.1037/a0020148
- Ryan, J. J., Glass, L. A., & Brown, C. N. (2007). Administration time estimates for Wechsler Intelligence Scale for Children-IV subtests, composites, and short forms. *Journal of Clinical Psychology*, 63(4), 309–318. doi:10.1002/jclp.20343
- Ryan, J. J., & Ward, L. C. (1999). Validity, reliability, and standard errors of measurement for two seven-subtest short forms of the Wechsler Adult Intelligence Scale—III. *Psychological Assessment*, 11(2), 207–211. doi:10.1037/1040-3590.11.2.207
- Saklofske, D. H., Weiss, L. G., Raiford, S. E., & Prifitera, A. (2005). Advanced interpretive issues with the WISC-IV Full-Scale IQ and General Ability Index Scores. In L. G. Weiss, D. H. Saklofske, A. Prifitera, & J. Holdnack (Eds.), *WISC-IV Advanced Clinical Interpretation* (pp. 99–138). San Diego: Elsevier Academic Press.
- Sattler, J. M., & Ryan, J. J. (2009). *Assessment with the WAIS-IV*. La Mesa, California: Jerome M. Sattler, Publisher, Inc.
- Shaw, P., Greenstein, D., Lerch, J., Clasen, L., Lenroot, R., Gogtay, N., Evans, A., Rapoport, J. & Giedd, J. (2006). Intellectual ability and cortical development in children and adolescents. *Nature*, 440(7084), 676–679. doi:10.1038/nature04513
- Shi, J., Tao, T., Chen, W., Cheng, L., Wang, L., & Zhang, X. (2013). Sustained attention in intellectually gifted children assessed using a continuous performance test. *PLoS ONE*, 8(2). doi:10.1371/journal.pone.0057417
- Simpson, M., Carone, D. A., Burns, W. J., Seidman, T., Montgomery, D., & Sellers, A. (2002). Assessing giftedness with the WISC-III and the SB-IV. *Psychology in the Schools*, 39(5), 515–524. doi:10.1002/pits.10057
- Silverstein, A. B. (1990). Short forms of individual intelligence tests. *Psychological Assessment*, 2(1), 3–11. doi:10.1037/1040-3590.2.1.3
- Spearman, C. (1904). “General Intelligence,” Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2), 201–93. doi:10.2307/1412107
- Tellegen, A., & Briggs, P. F. (1967). Old wine in new skins: grouping wechsler subtests into new scales. *Journal of Consulting Psychology*, 31(5), 499–506. doi:10.1037/h0024963
- Thomeer, M. L., Lopata, C., Volker, M. A., Toomey, J. A., Lee, G. K., Smerbeck, A. M., Rodgers, J. D., McDonald, C. A., & Smith, R. A. (2012). Randomized Clinical Trial Replication of a Psychosocial Treatment for Children with High-Functioning Autism Spectrum Disorders. *Psychology in the Schools*, 49(10), 942–954. doi:10.1002/pits.21647
- Toffalini, E., Giofrè, D., & Cornoldi, C. (2017). Strengths and Weaknesses in the Intellectual Profile of Different Subtypes of Specific Learning Disorder: A Study on 1,049

- Diagnosed Children. *Clinical Psychological Science*, 5(2), 402–409. doi:10.1177/2167702616672038
- Toffalini, E., Pezzuti, L., & Cornoldi, C. (2017). Einstein and dyslexia: Is giftedness more frequent in children with a specific learning disorder than in typically developing children? *Intelligence*, 62, 175–179. doi:10.1016/j.intell.2017.04.006
- van Viersen, S., de Bree, E. H., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Jong, P. F. (2015). Risk and protective factors in gifted children with dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 65(3), 178–198. doi:10.1007/s11881-015-0106-y
- van Viersen, S., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Bree, E. H. (2014). High Reading Skills Mask Dyslexia in Gifted Children. *Journal of Learning Disabilities*, 49(2), 189–199. doi:10.1177/0022219414538517
- Volker, M. A., Lopata, C., & Cook-Cottone, C. (2006). Assessment of children with intellectual giftedness and reading disabilities. *Psychology in the Schools*, 43(8), 855–869. doi:10.1002/pits.20193
- Warne, R. T. (2016). Five Reasons to Put the g Back Into Giftedness: An Argument for Applying the Cattell-Horn-Carroll Theory of Intelligence to Gifted Education Research and Practice. *Gifted Child Quarterly*, 60(1), 3–15. doi:10.1177/0016986215605360
- Watkins, M. W. (2017). The reliability of multidimensional neuropsychological measures: from alpha to omega. *Clinical Neuropsychologist*, 31(6–7), 1113–1126. doi:10.1080/13854046.2017.1317364
- Watkins, M. W., Greenawalt, C. G., & Marcell, C. M. (2002). Factor Structure of the Wechsler Intelligence Scale for Children-Third Edition among Gifted Students. *Educational and Psychological Measurement*, 62(1), 164–172. doi:10.1177/0013164402062001011
- Wechsler, D. (2005). *Manuel de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants – 4e édition* [Manual for the Wechsler Intelligence Scale for Children – fourth edition]. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Wechsler, D. (2014). *Wechsler Intelligence Scale for Children* (5th ed.). Bloomington, MN: Pearson
- Weiss, L. G., Beal, A. L., Saklofske, D. H., Alloway, T. P., & Prifitera, A. (2008). Interpretation and intervention with WISC-IV in the clinical assessment context. In A. Prifitera, D. H. Saklofske, & L. G. Weiss (Eds.), *WISC-IV. Clinical assessment and intervention* (2e ed., pp. 3–66). San Diego: Elsevier Inc.
- Weiss, L. G., Keith, T. Z., Zhu, J., & Chen, H. (2013). WISC-IV and Clinical Validation of the Four- and Five-Factor Interpretative Approaches. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 31(2), 114–131. doi:10.1177/0734282913478032
- Winner, E. (2000). The origins and ends of giftedness. *American Psychologist*, 55(1), 159–169. doi:10.1037/0003-066X.55.1.159
- Zou, G. Y. (2007). Toward using confidence intervals to compare correlations. *Psychological Methods*, 12(4), 399–413. doi:10.1037/1082-989X.12.4.399

## **2. LES CAPACITÉS ATTENTIONNELLES**

L'attention est l'une des capacités cognitives essentielles dans le fonctionnement intellectuel (Schweizer & Moosbrugger, 2004 ; Schweizer, Moosbrugger, & Goldhammer, 2005 ; Tullo, Faubert, & Bertone, 2018). Elle correspond à la capacité de l'individu à assigner ses propres ressources cognitives afin de traiter une ou plusieurs informations. Cela signifie qu'une information peut être traitée si et seulement si l'individu attribue des ressources nécessaires à son traitement. Le monde est donc perçu au travers d'un filtre créé par les capacités attentionnelles de l'individu.

Dans la littérature, de nombreuses études montrent que les enfants à haut potentiel intellectuel déploient leurs capacités attentionnelles plus rapidement et plus efficacement que leurs pairs (Johnson et al., 2003 ; Shi et al., 2013 ; Zhang, Zhang, He, & Shi, 2016). L'attention a un rôle important dans les apprentissages (Posner & Rothbart, 2014). Les enfants à haut potentiel intellectuel acquièrent des connaissances rapidement et résolvent diligemment les problèmes posés (Gottfredson, 1997b ; Robinson, Zigler, & Gallagher, 2000). Pourtant, des difficultés attentionnelles et une agitation motrice peuvent être observées chez certains de ces enfants à haut potentiel intellectuel. Ces difficultés peuvent parfois occulter leur identification en privilégiant le diagnostic d'un trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH ; Beljan, Webb, Amend, Web, Goerss, & Olenchak, 2006 ; Reis & McCoach, 2002). La manifestation de difficultés attentionnelles et psychomotrices peut souvent s'expliquer par l'ennui de ces enfants particuliers (Antshel, 2008 ; Hartnett et al., 2004 ; Mullet & Rinn, 2015). Par exemple, l'exercice proposé peut manquer d'intérêt, car l'enfant à haut potentiel intellectuel le considère comme trop facile et montre ainsi une faible motivation à réaliser cette tâche. En d'autres termes, les enfants à haut potentiel intellectuel



peuvent avoir une attention labile et s'agiter durant des tâches cognitives peu stimulantes et peu motivantes. L'inadéquation entre les besoins des enfants à haut potentiel intellectuel et les demandes scolaires peut être une des raisons de leur sous-performance à l'école, c'est-à-dire un écart important entre leur potentiel intellectuel et leurs performances scolaires (Reis & McCoach, 2000). L'adaptation pédagogique doit donc tenir compte du potentiel d'apprentissage des enfants à haut potentiel intellectuel (Matthews & McBee, 2007). Toutefois, certains de ces enfants peuvent présenter des difficultés attentionnelles et des agitations motrices liées à un TDAH avéré (Antshel et al., 2007). Ces enfants sont qualifiés de « doublement exceptionnels » (*twice exceptional* en anglais), c'est-à-dire des enfants ayant un haut potentiel intellectuel et un trouble des apprentissages, tel que le TDAH (Foley Nicpon, Assouline, & Colangelo, 2013 ; Reis et al., 2014). Par conséquent, l'investigation des capacités attentionnelles chez les enfants à haut potentiel intellectuel semble essentielle afin de comprendre leur fonctionnement cognitif caractéristique. L'exploration du développement des capacités attentionnelles chez les enfants à haut potentiel intellectuel permettrait également d'avoir un meilleur discernement des spécificités de ces enfants au développement atypique (Vaivre-Douret, 2004 ; 2011).

En psychologie cognitive, l'attention n'est pas un concept unitaire, mais un regroupement de mécanismes multiples de contrôle cognitif et perceptif (Chun, Golomb, & Turk-Browne, 2011). Cependant, il n'existe pas de consensus sur la taxonomie des différents composants de l'attention (voir Coull, 1998 ; Schweizer et al., 2005 pour une discussion détaillée). De plus, il existe très peu d'outils standardisés évaluant plusieurs aspects de l'attention en même temps et avec des stimuli simples en évitant d'impliquer d'autres aptitudes cognitives comme le raisonnement. L'Attention Network Test (ANT) a l'avantage d'être une épreuve courte évaluant, avec des stimuli simples, différents aspects de l'attention. Ce type de tâche a été

utilisé aussi bien chez le jeune enfant que chez la personne âgée (Ishigami & Klein, 2011 ; Mullane, Lawrence, Corkum, Klein, & McLaughlin, 2014 ; Pozuelos, Paz-Alonso, Castillo, Fuentes, & Rueda, 2014 ; Rueda, Fan, McCandliss, Halparin, Gruber, Lercari, & Posner, 2004 ; Rueda, Posner, Rothbart, & Davis-Stober, 2004 ; Westlye, Grydeland, Walhovd, & Fjell, 2010), ou encore chez le singe rhésus (Bramlett-Parker & Washburn, 2016). L'ANT apporte une évaluation rapide de plusieurs aspects de l'attention définis par Posner et Petersen (1990 ; Petersen & Posner, 2012), c'est-à-dire l'alerte, l'orientation et le contrôle attentionnel. Ce système attentionnel a été étudié dans de nombreuses études empiriques auprès de populations au développement typique (Ishigami & Klein, 2011 ; Konrad et al., 2005 ; Lewis, Reeve, & Johnson, 2016 ; Mullane et al., 2014 ; Pozuelos et al., 2014 ; Rueda et al., 2004 ; Waszak, Li, & Hommel, 2010 ; Westlye et al., 2010) et atypique (Kapa & Colombo, 2013 ; Keehn, Müller, & Townsend, 2013 ; Mullane, Corkum, Klein, McLaughlin, & Lawrence, 2010 ; Pizzo et al., 2010 ; Stoddard, Beckett, & Simon, 2010). En revanche, peu d'études se sont intéressées aux différentes composantes de ce système attentionnel chez les enfants à haut potentiel intellectuel.

### **2.1. Les réseaux attentionnels**

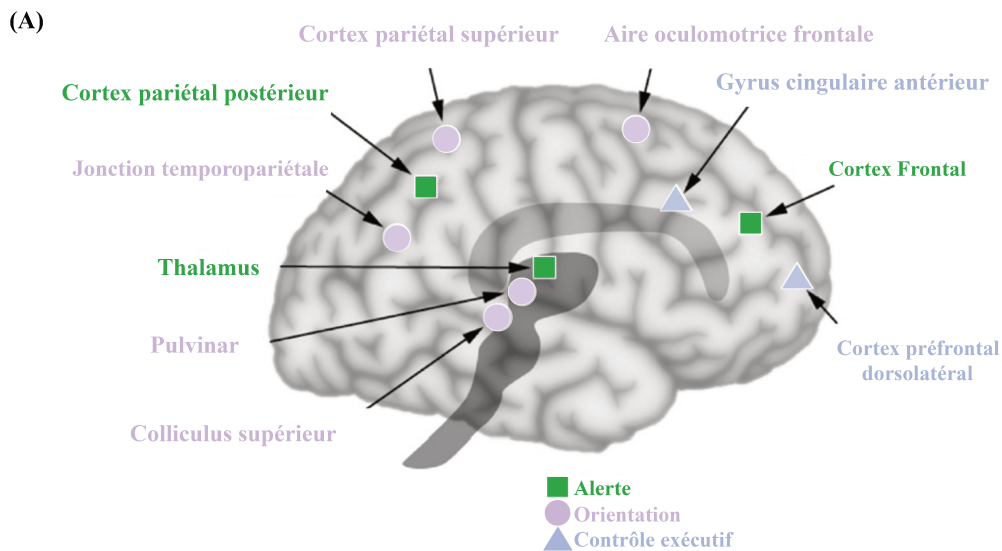
Selon Posner & Petersen (1990 ; Petersen & Posner, 2012), le système attentionnel serait composé de 3 réseaux attentionnels : 1) le réseau d'alerte correspondant à la capacité d'initier et de maintenir un état de vigilance afin de réagir aux stimuli à venir ; 2) le réseau d'orientation permettant de sélectionner une information pertinente pour le traitement en cours ; 3) le système du contrôle exécutif impliquant la capacité à gérer les interférences dans la résolution de conflits. Bien que l'interdépendance de ces réseaux attentionnels semble être de plus en plus observé (McConnell & Shore, 2011 ; Wang et al., 2015), les études par

imagerie ont montré l'existence de régions cérébrales spécifiques impliquées dans ces 3 réseaux attentionnels (Fan, McCandliss, Fossella, Flombaum, & Posner, 2005 ; Konrad et al., 2005 ; Petersen & Posner, 2012 ; Posner, 2012).

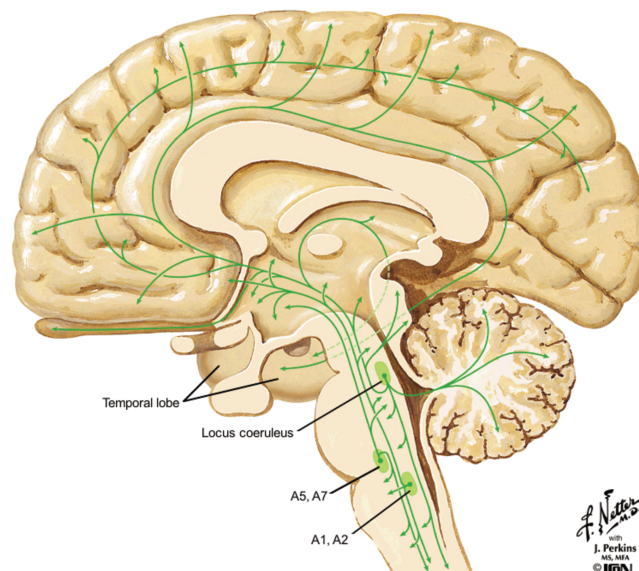
### **2.1.1. Le réseau d'alerte**

Le réseau d'alerte peut être divisé en 2 mécanismes cognitifs : 1) L'alerte intrinsèque (ou tonique) correspond à la capacité de contrôler l'état de vigilance en l'absence d'indice externe pendant un laps de temps. L'alerte intrinsèque peut être assimilée à l'attention soutenue (Robertson, Ridgeway, Greenfield, & Parr, 1997) ; 2) L'alerte phasique permet d'accroître la réaction de l'individu pendant une courte période après avoir reçu un signal externe (Sturm & Willmes, 2001). Habituellement, l'effet d'alerte est estimé par la différence de performance entre une tâche impliquant l'aspect intrinsèque de l'alerte et une autre tâche impliquant l'aspect phasique de l'alerte (Posner, 2008). Le réseau d'alerte serait interdépendant avec les réseaux d'orientation et du contrôle exécutif. De nombreuses études ont montré une faible corrélation entre l'effet d'alerte et l'effet du contrôle exécutif (Callejas, Lupiàñez, Funes, & Tudela, 2005 ; Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002 ; Fossella, Sommer, Fan, Wu, Swanson, Pfaff, & Posner, 2002 ; Ishigami & Klein, 2010 ; MacLeod et al., 2010 ; Weinbach & Henik, 2013). En effet, l'effet d'alerte modulerait l'effet du contrôle exécutif en le parasitant (Callejas et al., 2005 ; Fan et al., 2002). Plus le réseau d'alerte est réactif, moins le réseau du contrôle exécutif est efficace. Inversement, le réseau d'alerte influencerait le réseau d'orientation en accélérant la vitesse d'exécution du réseau d'orientation spatiale (Abundis-Gutiérrez, Checa, Castellanos, & Rueda, 2014 ; Callejas et al., 2005 ; Pozuelos et al., 2014).

La Figure 5 montre les différentes aires cérébrales impliquées dans le réseau d'alerte. Le cortex pariétal droit postérieur et le cortex frontal droit sont impliqués dans le fonctionnement du réseau d'alerte (Raz & Buhle, 2006 ; Sturm & Willmes, 2001). Par ailleurs, l'aspect phasique du système d'alerte activerait spécifiquement des structures fronto-pariétales de l'hémisphère gauche (Sturm & Willmes, 2001). Cette activation serait due au traitement de l'indice externe utilisé pour améliorer l'état de vigilance (Coull, Nobre, & Frith, 2001). Le réseau d'alerte serait modulé par la projection d'un neurotransmetteur spécifique, la noradrénaline produite au niveau du locus coeruleus (Green et al., 2008 ; Petersen & Posner, 2012). La Figure 5 montre les différentes aires cérébrales (A) et le circuit de diffusion de la noradrénaline (B) impliqués dans le fonctionnement du réseau d'alerte.



(B)



**Figure 5 : (A) Cartographie de l'anatomie cérébrale du réseau d'alerte adaptée de Posner & Rothbart (2007) ; (B) Circuit noradrénergique impliqué dans le réseau d'alerte d'après Felten et Shetty (2010).**

Le réseau d'alerte peut être altéré par le manque de sommeil (Waldon, Vriend, Davidson, & Corkum, 2015) et par des troubles des apprentissages comme le TDAH (Booth, Carlson, & Tucker, 2007 ; Cao et al., 2008 ; Konrad, Neufang, Hanisch, Fink, & Herpertz-Dahlmann, 2006 ; Mullane et al., 2010 ; Oberlin, Alford, & Marrocco, 2005 ; Posner, 2008). En effet, les enfants ayant un TDAH ont des difficultés à maintenir l'état d'alerte en l'absence d'un signal externe (c.-à-d. l'alerte intrinsèque), et leur état de vigilance bénéficie plus faiblement que

leurs pairs d'un indice visuel (Oberlin et al., 2005) ou d'un indice auditif (Mullane et al., 2010). Les enfants ayant un TDAH auraient une activation plus faible du gyrus cingulaire droit et une activité plus élevée au niveau du locus coeruleus que leurs pairs (Konrad et al., 2006). Ce pattern d'activation expliquerait les temps de réponse plus longs chez ces enfants lors de la détection d'une cible sans l'aide d'un indice. En effet, le recrutement des informations nécessaires au traitement des stimuli à l'emplacement attendu serait plus difficile chez ces enfants ayant un TDAH.

### **2.1.2. Le réseau d'orientation**

Le réseau d'orientation allouerait sélectivement les ressources attentionnelles de l'individu à une zone saillante d'un stimulus pouvant être multimodal. Autrement dit, ce système attentionnel est responsable du déplacement du focus attentionnel de l'individu vers un événement perçu. L'effet de l'orientation attentionnelle est habituellement estimé à partir de la différence de performances à des tâches cognitives impliquant 2 mécanismes distincts (Posner, 2016 ; Raz & Buhle, 2006 ; Ristic & Kingstone, 2012) : 1) L'orientation de type exogène est impliquée lors de la détection d'un indice informant sur l'emplacement correct de l'apparition future de la cible. L'aspect exogène du réseau d'orientation correspond donc à la rapidité d'allocation des ressources attentionnelles à l'aide d'un indice externe pouvant être multisensoriel. Ce mécanisme cognitif implique une activation de processus automatiques ne requérant que peu de contrôle volontaire par l'individu, et résiste aux événements interférents (Prinzmetal, Zvinyatskovskiy, Gutierrez, & Dilem, 2009) ; 2) L'orientation de type endogène est sollicité lorsque l'individu doit traiter un stimulus considéré pertinent sans la présence d'indice informant la future localisation de la cible. Cet aspect de l'orientation attentionnelle correspondrait à l'attention sélective (Gazzaley & Nobre, 2012). L'aspect endogène du réseau

d'orientation implique donc un désengagement et une réattribution volontaire des ressources attentionnelles vers la cible considérée comme pertinente (Konrad et al., 2005). Ce mécanisme cognitif endogène nécessite des processus plus contrôlés par l'individu. Par conséquent, l'efficacité de ce mécanisme est plus sensible aux événements distractifs (Prinzmetal et al., 2009).

Le réseau d'orientation joue un rôle important dans les différents processus de mémorisation. Les mécanismes endogène et exogène du réseau d'orientation influencent différemment les capacités mnésiques (Botta, Santangelo, Raffone, Lupiáñez, & Belardinelli, 2010 ; Green et al., 2008 ; Hauer & MacLeod, 2006 ; Ross-Sheehy, Oakes, & Luck, 2010). Certaines études ont montré que l'orientation endogène influence l'encodage des informations sollicitées par la capacité de la mémoire de travail (voir Gazzaley & Nobre, 2012 pour une revue). D'autres études ont montré que l'orientation exogène facilite l'encodage perceptuel influençant ainsi les capacités de mémorisation implicite (par ex. l'amorçage) de stimuli conceptuels, comme des catégories de mots, ou de stimuli perceptuels, tels que la vitesse de lecture de mot (Hauer & MacLeod, 2006 ; Pereira, Smith & Yu, 2013). Cependant, ces résultats ne semblent pas être consistants. Dans la littérature, certaines recherches n'ont pas réussi à montrer une corrélation significative entre les deux types de mécanismes cognitifs du réseau d'orientation et les capacités mnésiques (Ortiz-Tudela, Milliken, Jiménez, & Lupiáñez, 2018 ; Parasuraman, Greenwood, Kumar, & Fossella, 2005).

Le réseau d'orientation est interdépendant des réseaux de l'alerte et du contrôle exécutif. Comme nous l'avons vu précédemment, la rapidité d'exécution du réseau d'orientation est facilitée par la réactivité du réseau d'alerte (Abundis-Gutiérrez et al., 2014 ; Callejas et al., 2005 ; Pozuelos et al., 2014). De plus, l'efficacité du réseau d'orientation augmente

l'efficacité de celui du contrôle exécutif (Abundis-Gutiérrez et al., 2014 ; Callejas et al., 2005).

Le système cholinergique joue un rôle crucial dans le réseau d'orientation (Parasuraman et al., 2005 ; Posner, Rothbart, Sheese, & Voelker, 2012). La Figure 6 montre les différentes aires cérébrales impliquées dans le réseau d'orientation. La plupart des études montrent l'implication bilatérale des régions frontales et pariétales lorsque le réseau d'orientation est sollicité (Meyer, Du, Parks, & Hopfinger, 2018 ; Petersen & Posner, 2012). Plus précisément, le mécanisme exogène implique l'activation des réseaux neuronaux reliant la jonction temporopariétale et le cortex frontal ventral (Corbetta, Patel, & Shulman, 2008 ; Corbetta & Shulman, 2002). Le mécanisme endogène serait lié aux réseaux neuronaux impliquant l'aire oculomotrice frontale (FEF, *frontal eye fields* en anglais), le sillon intrapariétal et le cortex pariétal supérieur (Corbetta & Shulman, 2002). Lors de l'apparition d'un stimulus inattendu, l'activation du réseau fronto-pariétal ventral (c.-à-d. le mécanisme exogène) serait prioritaire par rapport à l'activation du système dorsal (c.-à-d. le mécanisme endogène), permettant ainsi d'engager le focus attentionnel le plus rapidement possible vers l'évènement saillant (Corbetta & Shulman, 2002). Par ailleurs, certaines études ont également montré l'implication des aires sous-cortical, telles le pulvinar et le colliculus supérieur dans le réseau d'orientation (Posner & Petersen, 1990). La Figure 6 montre les aires cérébrales (A) et le circuit de diffusion de l'acétylcholine (B) qui sont impliqués dans le fonctionnement du réseau d'orientation.



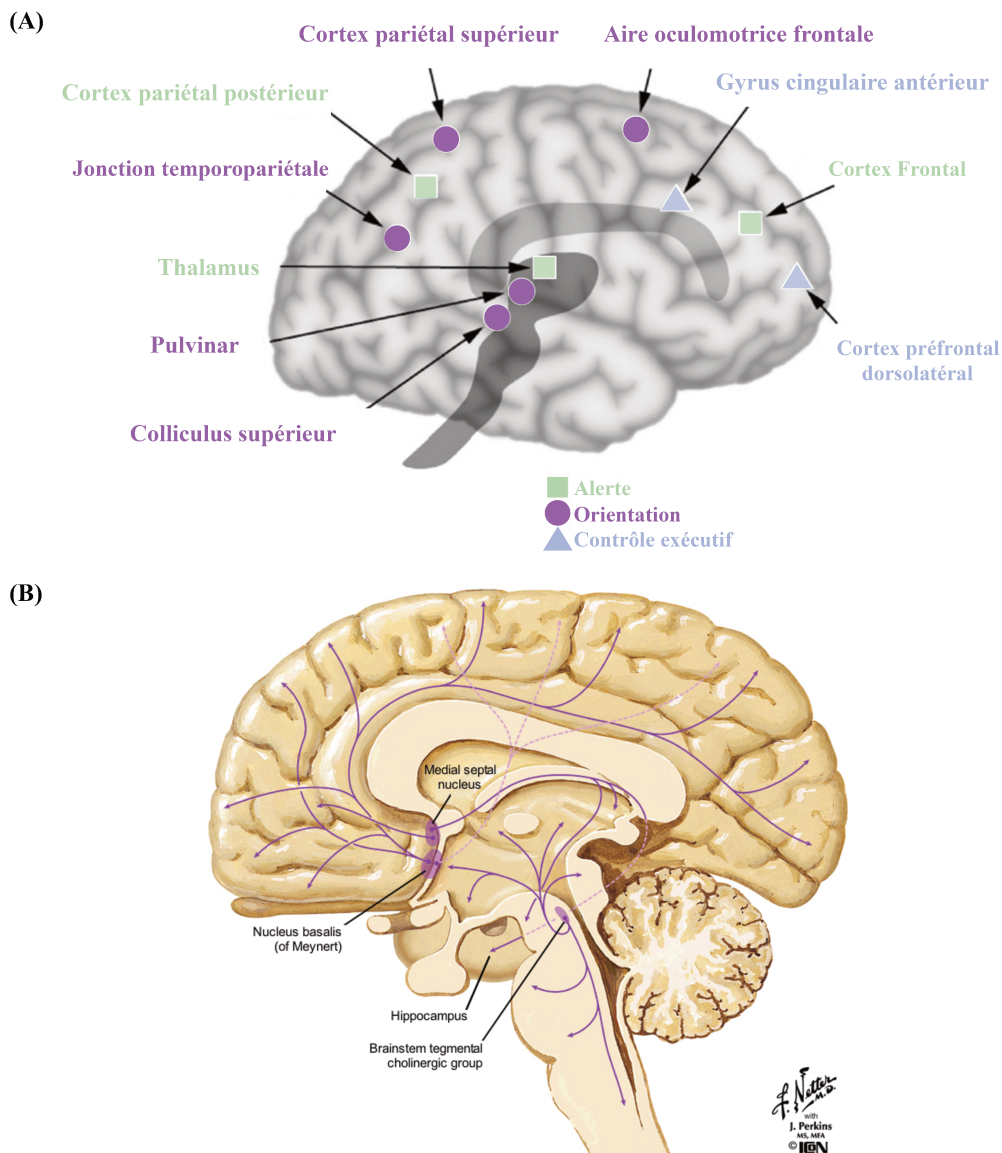
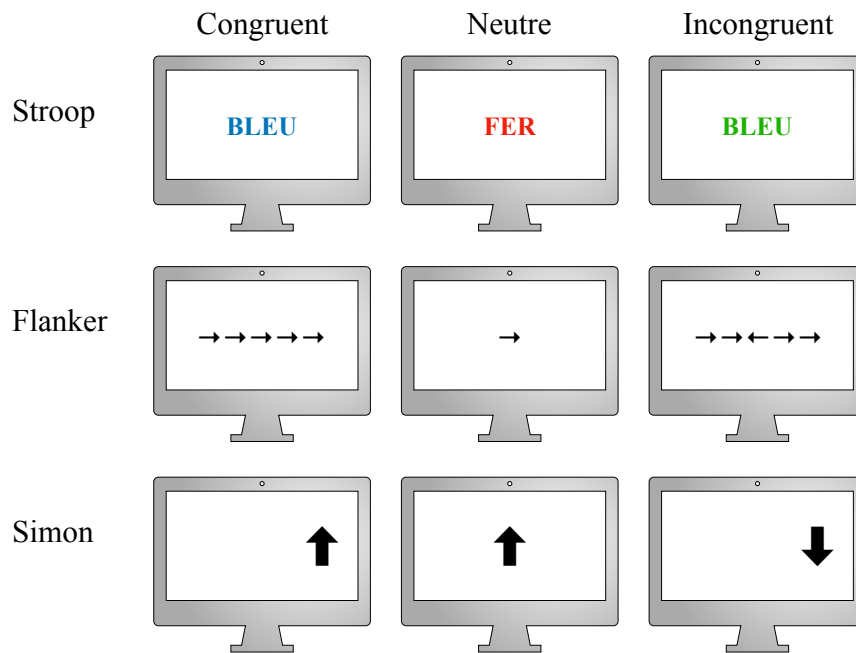


Figure 6 : (A) Cartographie de l’anatomie cérébrale du réseau d’orientation adaptée de Posner & Rothbart (2007) ; (B) Circuit cholinergique impliqué dans le réseau d’orientation d’après Felten et Shetty (2010).

### 2.1.3. Le réseau du contrôle exécutif

Le réseau du contrôle exécutif est lié à la capacité de détecter des anomalies et de gérer les interférences dans l’objectif de résoudre des conflits (Petersen & Posner, 2012). Ce système attentionnel est essentiel à l’individu afin de s’adapter à son environnement en perpétuel changement. Le réseau du contrôle exécutif demande une forte maîtrise volontaire du comportement par rapport aux 2 autres réseaux attentionnels (Rueda, Posner, & Rothbart, 2005). En effet, la capacité à contrôler volontairement ses pensées et ses comportements est

nécessaire dans la résolution d'un conflit. L'individu doit prendre conscience de l'existence de l'anomalie, inhiber la réponse habituelle, et enfin répondre à l'exigence de la situation actuelle considérée comme conflictuelle (Rueda et al., 2005). En lien avec cette définition du contrôle exécutif, 3 types de tâches cognitives sont habituellement utilisées dans la littérature pour évaluer son efficacité (voir Figure 7). Toutes ces tâches comportent 3 conditions : congruente, neutre et incongruente. La tâche de Stroop demande au participant d'identifier la couleur d'impression du mot (Stroop, 1935). Dans ce type de tâche, le participant est confronté à 3 situations : 1) le sens du mot et la couleur d'impression ont un lien (c.-à-d. congruent), 2) le sens du mot et la couleur d'impression n'ont pas de lien (c.-à-d. neutre), et 3) le sens du mot et la couleur d'impression ont un lien opposé (c.-à-d. incongruent). La tâche de flanker (Eriksen & Eriksen, 1974) sollicite le participant à indiquer le sens de la flèche du milieu parmi d'autres flèches du même sens (c.-à-d. congruent), ou sans autre flèche (c.-à-d. neutre), ou parmi d'autres flèches de sens inverse (c.-à-d. incongruent). Enfin, la tâche de Simon (Fan, Flombaum, McCandliss, Thomas, & Posner, 2003) est liée à l'incompatibilité spatiale de la flèche. Par exemple, lorsque la flèche située à droite de l'écran pointe vers le haut, le participant doit appuyer sur la flèche droite du clavier (c.-à-d. congruent) ; lorsque la flèche située au milieu de l'écran pointe vers le haut, le participant doit appuyer sur la flèche droite du clavier (c.-à-d. neutre) ; et lorsque la flèche située à droite de l'écran pointe vers le bas, le participant doit appuyer sur la flèche gauche du clavier (c.-à-d. incongruent).



**Figure 7. Exemples de tâches cognitives les plus utilisées pour estimer la capacité du contrôle exécutif.**

Ces différentes tâches expérimentales ont permis de mettre en évidence le rôle important du réseau du contrôle exécutif sur les performances scolaires (Checa & Rueda, 2011) et sur l'auto-régulation des pensées, des émotions et des comportements (Bush, Luu, & Posner, 2000 ; Rueda et al., 2005). Le contrôle exécutif permet à l'individu de focaliser son attention volontairement et exclusivement sur le traitement de l'information préalablement détectée comme pertinente. Ce traitement nécessite de faire fi de tout événement pouvant perturber la focalisation de l'attention. Le mécanisme de contrôle est volontaire et fondamental afin de pouvoir inhiber les pensées ou/et les comportements non adéquats à la résolution du conflit. Ce mécanisme est essentiel pour l'acquisition des nouvelles connaissances (Posner & Rothbart, 2014). Il semble avoir également un rôle important dans le fonctionnement de la mémoire de travail (Redick & Engle, 2006) et des capacités intellectuelles (Cowan, Fristoe, Elliott, Brunner, & Saults, 2006).

La réactivité du réseau du contrôle exécutif peut être influencée par les troubles des apprentissages, comme le TDAH (Mullane et al., 2010 ; Oberlin et al., 2005), et par l'interaction avec les autres réseaux attentionnels (Cajellas et al., 2005 ; Pozuelos et al., 2014). La vitesse de traitement du contrôle exécutif est plus lente que celle de l'alerte et de l'orientation. Cette différence de réactivité du contrôle exécutif est due au mécanisme du contrôle volontaire qui demande une forte attribution attentionnelle. Le contrôle exécutif peut être parasité par l'apparition d'un nouveau stimulus en impliquant l'activation du mécanisme exogène du réseau d'alerte (Callejas et al., 2005 ; Fan et al., 2002). Cette interaction est amplifiée dans le cadre du TDAH. En effet, les enfants atteints de TDAH sont plus vulnérables aux événements interférents et sont moins réactifs lors de la résolution de conflit que leur pairs (Mullane et al., 2010). *A contrario*, la réactivité du focus attentionnel vers un stimulus saillant facilite l'efficacité du contrôle exécutif (Abundis-Gutiérrez et al., 2014 ; Callejas et al., 2005). Malgré l'interdépendance entre les réseaux attentionnels, le réseau du contrôle exécutif implique indubitablement des régions cérébrales et un circuit de neurotransmetteurs différents des 2 autres réseaux attentionnels (Corbetta & Shulman, 2002 ; Green et al., 2008 ; Petersen & Posner, 2012)

Les études par imagerie ont mis en évidence l'implication de 2 réseaux neuronaux différents dans le fonctionnement du réseau du contrôle exécutif (Corbetta & Shulman, 2002 ; Green et al., 2008 ; Petersen & Posner, 2012 ; Raz, 2004 ; Raz & Buhle, 2006) : 1) Le gyrus cingulaire antérieur est impliqué dans la régulation des cognitions et des émotions (Petersen & Posner, 2012). Plus précisément, la partie dorsale du gyrus cingulaire antérieur serait spécialisée dans la régulation de conflit de type cognitif, alors que la partie ventrale du gyrus cingulaire antérieur régulerait spécifiquement les conflits de type émotionnel (Raz & Buhle,

2006). Le gyrus cingulaire antérieur est décrit comme un système de rétrocontrôle des conséquences des actions réalisées après la résolution de conflit (Petersen & Posner, 2012) ;

2) Le cortex préfrontal dorsolatéral est sollicité dès la détection d'une anomalie ou d'un conflit. Il va être impliqué directement dans la résolution du conflit (Fan et al., 2005). Autrement dit, le cortex préfrontal dorsolatéral va s'activer en premier lieu afin de résoudre le conflit détecté, puis le gyrus cingulaire antérieur va être secondairement activé afin de vérifier la justesse de l'action. Cette activité neuronale va être modulée par le système dopaminergique (Petersen & Posner, 2012 ; Raz & Buhle, 2006). La Figure 8 montre les aires cérébrales (A) et le circuit de diffusion de la dopamine (B) qui sont impliqués dans le fonctionnement du réseau du contrôle exécutif. L'anatomie du réseau du contrôle exécutif implique donc des aires cérébrales distinctes de celles des 2 autres réseaux attentionnels. Par conséquent, le développement du réseau du contrôle exécutif a une trajectoire développementale particulière par rapport aux autres réseaux attentionnels (Konrad et al., 2005).

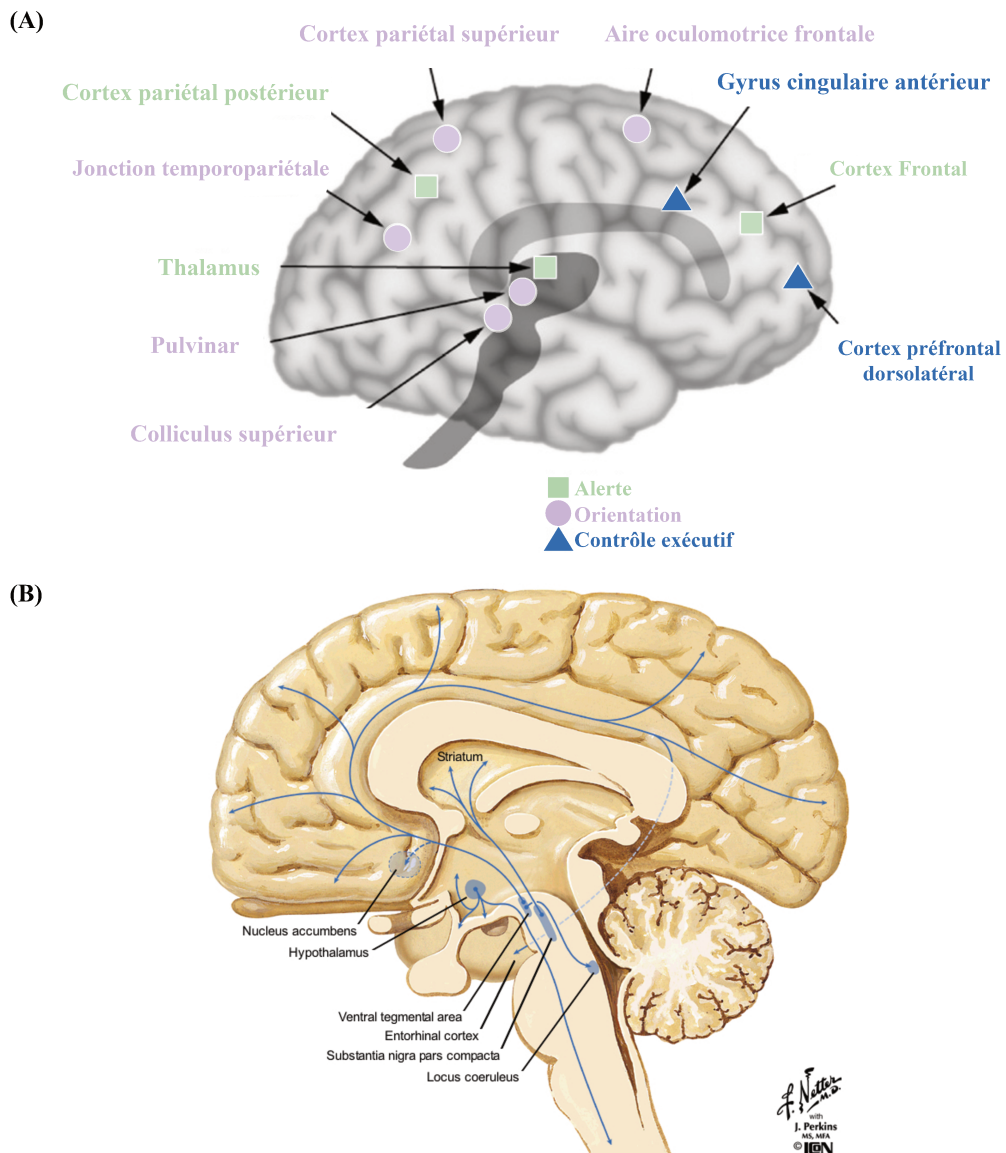


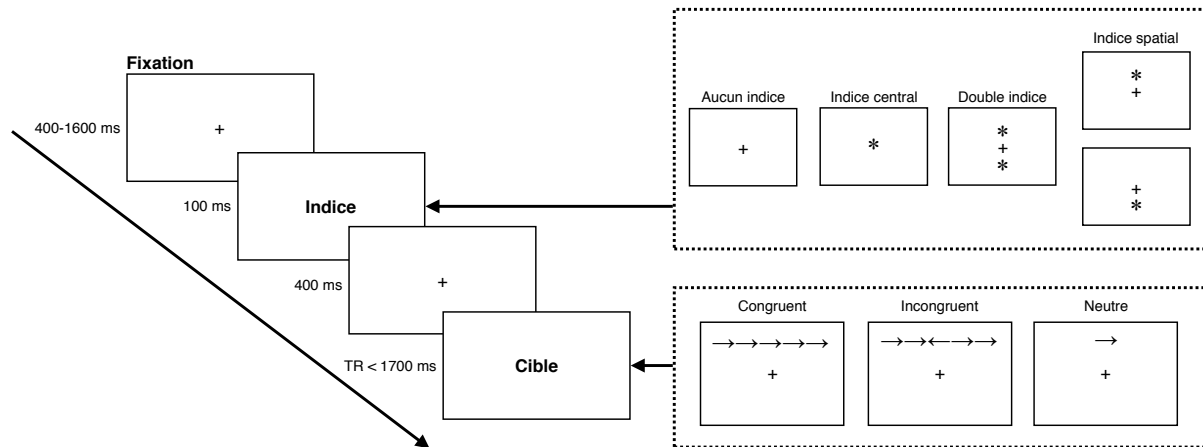
Figure 8 : (A) Cartographie de l'anatomie cérébrale du réseau du contrôle exécutif adaptée de Posner & Rothbart (2007) ; (B) Circuit cholinergique impliqué dans le réseau du contrôle exécutif d'après Felten et Shetty (2010).

## 2.2. Évaluation des réseaux attentionnels : Attention Networks Test

Les études princeps ont mis en évidence les réseaux attentionnels séparément. En d'autres termes, chaque réseau attentionnel était évalué à partir d'une seule épreuve dédiée au réseau investigué. Il était donc impossible d'étudier l'interaction entre ces 3 réseaux attentionnels, c'est-à-dire l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif. Fan et collaborateurs (2002) ont alors développé une épreuve simple et informatisée pour évaluer ces 3 systèmes attentionnels simultanément : l'Attention Network Test (ANT). Cette épreuve a été réalisée afin qu'elle

soit facile à mettre en place dans les études en imagerie médicale telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou la tomographie par émission de positons (TEP). C'est une épreuve relativement courte l'ensemble des réseaux attentionnels (Fan et al., 2002).

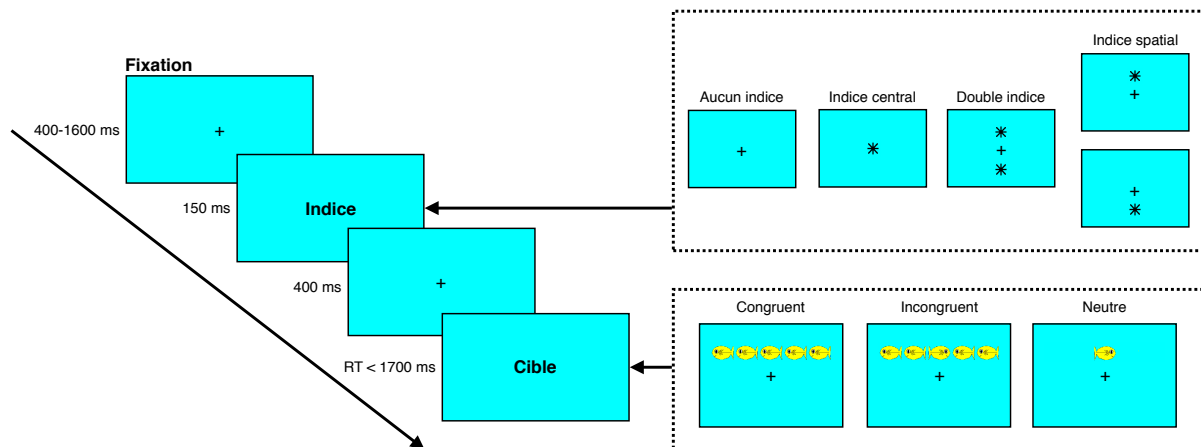
La simplicité de l'ANT réside dans l'utilisation de stimuli perceptuels nécessitant peu de traitement (par ex. des flèches et des astérisques) et une demande de réponse simple de la part du participant (par ex. appuyer sur une touche). Cette tâche combine deux paradigmes classiquement utilisés pour investiguer l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif, c'est-à-dire une tâche de gestion de l'interférence (*flanker task*, en anglais ; Eriksen & Eriksen, 1974) et une tâche de temps de réaction indicée (Posner, 1980). L'ANT permet ainsi d'estimer simultanément l'efficacité des réseaux d'alerte, d'orientation et du contrôle exécutif à partir de la précision et de la rapidité de réponse du participant selon l'apparition d'indices (*cue*, en anglais) et de distracteurs (*flanker*, en anglais). Tous les indices et les distracteurs ont la même probabilité d'apparaître à l'écran. Durant le déroulement de l'ANT (voir Figure 9), une flèche ou une rangée de 5 flèches est présentée de manière équiprobable au-dessus ou en dessous de la croix de fixation. Les participants sont invités à indiquer la direction d'une seule flèche centrale affichée sur l'écran (c.-à-d. condition neutre), ou la direction de la flèche centrale parmi les 4 autres flèches orientées soit dans la même direction (c.-à-d. condition congruente), soit dans la direction opposée (c.-à-d. condition incongruente). La présentation des flèches est précédée par une brève apparition équiprobable d'un indice parmi 4 possibles (c.-à-d. aucun indice, un indice central, un double indice ou un indice spatial). L'indice central (c.-à-d. un indice remplaçant temporairement la croix de fixation) et le double indice (c.-à-d. un indice apparaissant brièvement et simultanément au-dessus et en-dessous de la croix de fixation) permettent d'indiquer au participant que les cibles vont très prochainement apparaître. Chaque indice spatial informe correctement l'endroit d'apparition de la cible.



**Figure 9 : Procédure expérimentale de l'ANT.**

L'ANT est devenu rapidement une tâche classique en psychologie cognitive pour évaluer l'efficacité des réseaux attentionnels (MacLeod et al., 2010). Cette épreuve a été utilisée auprès d'adultes (Fan et al., 2002), d'adultes atteints d'acouphènes (Heeren et al., 2014), d'adultes atteints de sclérose en plaques (Ishigami, Fisk, Wojtowicz, & Klein, 2013), d'adultes ayant une anxiété sociale (Moriya, 2017), de personnes âgées (Ishigami, & Klein, 2011), d'enfants (Ishigami & Klein, 2015 ; Lewis et al., 2016 ; Mullane et al., 2014 ; Pozuelos, Paz-Alonso, Castillo, Fuentes, & Rueda, 2014 ; Rueda et al., 2004), d'enfants bilingues (Antón et al., 2014 ; Kapa & Colombo, 2013), d'enfants atteints de TDAH (Adolfstottir, Sorensen, & Lundervold, 2008 ; Mullane et al., 2010), mais également auprès d'animaux tels que le singe rhésus (Bramlett-Parker & Washburn, 2016). Toutes ces études montrent que l'ANT peut être utilisé auprès de populations très différentes. Cependant, ce type de tâche de chronométrie mentale est parfois perçu comme ennuyeux chez les enfants. Or, l'engagement du participant est très importante dans une tâche d'évaluation des capacités attentionnelles. Dans les études développementales, une version de l'ANT a alors été réalisée spécifiquement pour les enfants, afin de rendre la tâche plus ludique (Rueda et al., 2004 ; voir Figure 10).





**Figure 10 : Procédure expérimentale de l'ANT adaptée aux enfants.**

À partir de l'ANT, l'estimation de chaque réseau attentionnel s'effectue avec la méthode de Donders (voir Klein, 2003 pour une présentation détaillée), c'est-à-dire la soustraction des temps de réponse issus de deux conditions différentes. Autrement dit, cette méthode permet d'estimer le temps de l'opération mentale qui expliquerait la différence de temps de réponse de l'individu entre deux conditions différentes. Les scores de chaque réseau attentionnel sont ainsi déterminés : 1) le score d'alerte est calculé à partir de l'écart entre le temps médian de réponse dans la condition où aucun indice n'a précédé l'apparition des distracteurs et le temps médian de réponse dans la condition « double indice » ; 2) le score d'orientation est réalisé à partir de la soustraction du temps médian de réponse dans la condition « indice central » à celui dans la condition « indice spatial » ; 3) le score du contrôle exécutif est déterminé à partir de la soustraction du temps médian de réponse dans la condition « incongruente » à celui de la condition « congruente ». Cependant, l'efficacité des réseaux attentionnels n'est pas uniquement déterminée par l'analyse du temps de réponses. Avant la réalisation de l'épreuve, l'expérimentateur demande au participant de répondre le plus rapidement possible en faisant le moins d'erreur possible. L'ajustement entre la rapidité et la précision n'est pas le même entre les individus. Certains individus peuvent réaliser

rapidement la tâche en ne faisant aucune erreur, alors que d'autres peuvent avoir réalisé cette tâche durant le même intervalle de temps en faisant beaucoup d'erreurs. Par conséquent, le taux d'erreurs informe également sur la précision du réseau attentionnel. Le temps de réponse et la proportion d'erreurs sont alors deux mesures importantes de la performance des tâches de chronométrie mentale comme l'ANT (Draheim, Hicks, & Engle, 2016 ; MacLeod et al., 2010). Il est donc nécessaire de prendre en compte la rapidité et la précision dans l'analyse des performances aux différents réseaux attentionnels.

La tâche de l'ANT semble avoir une validité apparente, elle s'appuie sur deux tâches cognitives éprouvées, c'est-à-dire la tâche de Flanker (Eriksen & Eriksen, 1974) et la tâche de temps de réponse indicé (Posner, 1980). La combinaison de ces deux tâches est cohérente dans l'évaluation des différents réseaux attentionnels. Toutes les études comportementales ont montré que les scores de chaque réseau attentionnel sont différents de zéro, indiquant ainsi qu'il y a bien une différence entre chacune des conditions. Par conséquent, cette manipulation d'indices et de distracteurs agit sur les performances des individus comme attendu (Fan et al., 2005 ; Fan et al., 2002 ; Ishigami & Klein, 2010). Les études utilisant l'imagerie médicale et l'électroencéphalogramme ont montré que la variation de chaque score des réseaux attentionnels était associée à l'activité des réseaux neurologiques, identifiés par les études précédentes, liés à chaque système attentionnel (Fan et al., 2005 ; Kratz, Studer, Malcherek, Erbe, Moll, & Heinrich, 2011 ; Williams, Biel, Wegier, Lapp, Dyson, & Spaniol, 2016).

La fidélité des différents scores de l'ANT est estimée habituellement comme étant de faible à modérée. D'après la méta-analyse de MacLeod et collaborateurs (2010), le temps de réponse et la proportion d'erreurs de l'alerte et de l'orientation ont une fidélité estimée inférieure à .70, alors que les performances du contrôle exécutif sont généralement au-dessus

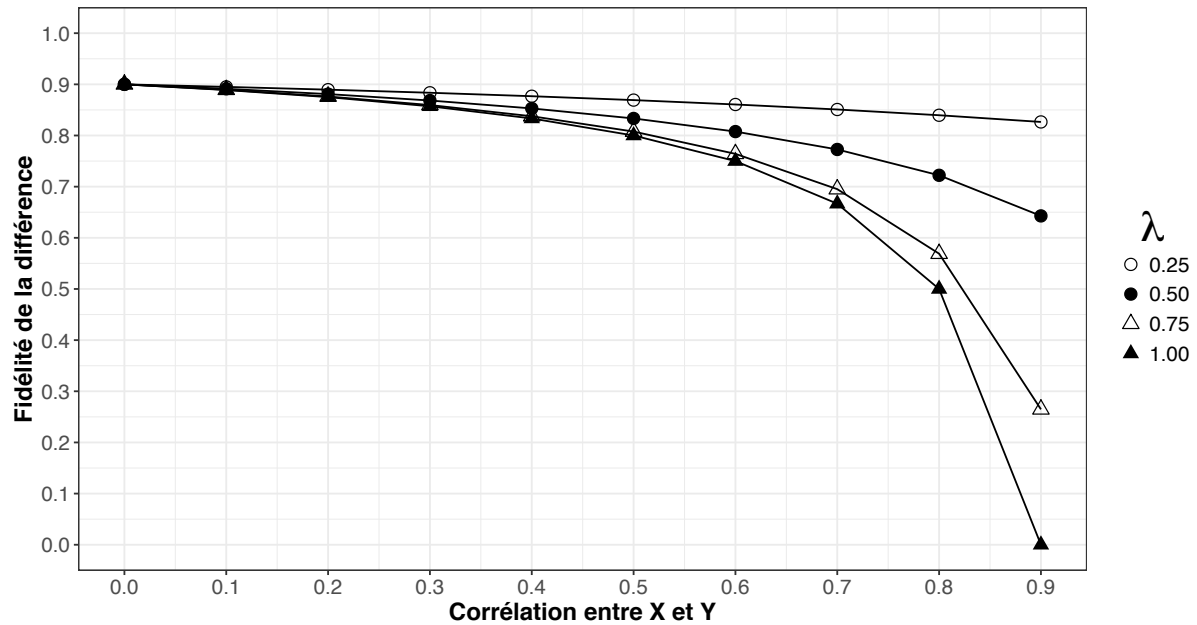
de ce seuil acceptable. Cette faible fidélité des scores de l’alerte et de l’orientation serait probablement due à la variabilité intra-individuelle (MacLeod et al., 2010). En effet, la fidélité d’une différence de score est tributaire de la variabilité de chaque score comparé, comme l’indique la formule proposée par Williams & Zimmerman (1996) :

$$\rho_{DD'} = \frac{(\lambda\rho_{XX'} + \lambda^{-1}\rho_{YY'} - 2\rho_{XY})}{(\lambda + \lambda^{-1} - \rho_{XY})} \quad (1)$$

où  $\rho_{DD'}$  est la fidélité de la différence entre le score X et le score Y,  $\rho_{XY}$  est la corrélation entre le score X et le score Y,  $\rho_{XX'}$  est la fidélité du score X,  $\rho_{YY'}$  est la fidélité du score Y et le paramètre  $\lambda$  correspond au ratio de la variabilité du score X ( $\sigma_X$ ) et de celle du score Y ( $\sigma_Y$ ), tel que  $\lambda = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y}$ .

En d’autres termes, plus la variabilité des scores des deux composants est identique et plus la corrélation entre ces scores est élevée, plus la fidélité de la différence de score diminue (voir Figure 11). Dans les tâches de chronométrie mentale comme l’ANT, la corrélation entre les scores des deux composants liés à un réseau attentionnel est positivement élevée, car les deux composants évaluent un processus attentionnel très similaire. De plus, ces scores de composant sont des variables intra-individuelles. Donc, le ratio de la variabilité de chaque score de composants (c.-à-d. le paramètre  $\lambda$ ) est très probablement proche de 1.0. En conclusion, la faible fidélité des scores de différence de rapidité et de précision serait due à une corrélation très forte et à la même variabilité intra-individuelle entre les deux composants comparés (Draheim et al., 2016 ; Hughes, Linck, Bowles, Koeth, & Bunting, 2013). Par ailleurs, la plupart des études analysent uniquement la variable de temps de réponse en omettant l’analyse du taux d’erreur. Certains auteurs ont donc argumenté d’utiliser des scores de différence combinant la rapidité et la précision, afin de prendre en compte la relation entre

ces deux mesures de performances, d'améliorer la fidélité de la mesure du processus attentionnel convoité et de faciliter l'interprétation des résultats (Draheim et al., 2016 ; Hughes et al., 2013 ; voir Vandierendonck, 2017 ; 2018 pour plus de détails).



**Figure 11 : Fidélité d'une différence de score ( $\rho_{DD'}$ ) en fonction de la corrélation du score X et du score Y ( $\rho_{XY}$ ) selon les valeurs de  $\lambda$  ( $\rho_{XX'} = \rho_{YY'} = .90$ )**

En conclusion, l'ANT est devenu classique pour évaluer simultanément les 3 réseaux attentionnels, c'est-à-dire l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif. Dans la littérature, plusieurs versions de l'ANT ont été créées. L'une d'entre elles a été rendue plus ludique pour étudier ces réseaux attentionnels chez l'enfant (Rueda et al., 2004). De nombreuses études ont montré que l'ANT offre une mesure valide, mais la fidélité des scores classiquement utilisés (c.-à-d. l'analyse séparée des temps médians de réponses et des proportions d'erreurs) est relativement faible, excepté peut-être pour le réseau du contrôle exécutif. Fort de ce constat, il serait pertinent d'utiliser un score combinant le temps médian de réponses et la proportion d'erreurs (Draheim et al., 2016 ; Hughes et al., 2013 ; Vandierendonck, 2017; 2018). Ce type de score permettrait d'améliorer la fidélité de la mesure et faciliterait les

conclusions concernant l'efficacité de chaque réseau attentionnel ainsi que leurs développements.

### **2.3. Le développement des réseaux attentionnels**

Quelques études se sont intéressées au développement des performances liées aux différents réseaux attentionnels et estimées à l'aide de l'ANT (Konrad et al., 2005; Lewis et al., 2016 ; Mullane et al., 2014, Pozuelos et al., 2014 ; Rueda et al., 2004. Certaines de ces études convergent vers une amélioration du réseau d'alerte entre 6 et 12 ans (Lewis, Reeve, & Johnson, 2016 ; Mullane et al., 2014, Pozuelos et al., 2014 ; Rueda et al., 2004). En effet, le réseau d'alerte devient de plus en plus efficace durant cette période, mais ce développement devient lent et progressif entre 8 et 12 ans (Pozuelos et al., 2014). Les enfants âgés entre 8 et 12 ans auraient une configuration d'activation cérébrale différente par rapport aux adultes. En effet, l'activation au niveau du gyrus cingulaire droit serait plus faible en comparaison à celle des adultes (Konrad et al., 2005). Cette hypoactivation spécifique causerait ainsi une diminution du recrutement d'informations au niveau des régions corticales essentielles dans l'efficacité du réseau d'alerte. Cependant, le développement de l'effet d'alerte jusqu'à l'âge adulte semble être très difficile à détecter au niveau comportemental (Konrad et al., 2005 ; Rueda et al., 2004).

Le réseau d'orientation joue un rôle important dans le développement du système d'auto-régulation au début du développement de l'enfant (Posner et al.). Ce réseau attentionnel est essentiel durant les premiers âges de l'enfance pour le développement des comportements sociaux précoces, tels que l'attention conjointe (Mundy & Newell, 2016), c'est-à-dire la capacité à coordonner sa propre attention avec celle d'un partenaire social. Ainsi, les difficultés d'attention conjointe des enfants atteints d'un trouble du spectre autistique peuvent

être mises en relation avec leur réseau d'orientation moins efficient que leurs pairs (Keehn, Lincoln, Müller, & Townsend, 2010 ; voir Keehn et al., 2013 pour une revue). Le système d'orientation se développe jusqu'à la fin de l'enfance (Pozuelos et al., 2014). Cependant, d'autres études ont observé une stabilité de l'efficacité du réseau d'orientation à partir de 6 ans (Mullane et al., 2014 ; Rueda et al., 2004). Cette inconsistance de résultats s'expliquerait par un rythme développemental spécifique pour chaque mécanisme cognitif sous-jacent au réseau d'orientation. L'aspect exogène du réseau d'orientation se développerait avant l'âge de 4 ans (Posner et al., 2014 ; Pozuelos et al., 2014). *A contrario*, l'aspect endogène du réseau d'orientation continue à se développer jusqu'à la fin de l'enfance (Abundis-Gutiérrez et al., 2014 ; Pozuelos et al., 2014). Cette différence de trajectoire développementale entre ces 2 mécanismes cognitifs peut s'expliquer par le développement des réseaux neuronaux fronto-pariétaux impliqués dans le réengagement du focus attentionnel vers la cible (Konrad et al., 2005).

L'efficacité du contrôle exécutif progresse très tôt dans l'enfance (Mezzacappa, 2004 ; Rueda et al., 2005). Certaines recherches ont montré une stabilité dans le développement du contrôle exécutif à partir de l'âge de 7 ans (Lewis et al., 2016 ; Rueda et al., 2004). D'autres investigations ont montré une augmentation de l'efficacité du réseau du contrôle exécutif jusqu'au début de l'adolescence (Mullane et al., 2014), voire jusqu'à l'âge adulte (Waszak et al., 2010). Cette inconsistance des résultats développementaux du contrôle exécutif peut être due aux tâches utilisées pour estimer l'effet du contrôle exécutif (Lewis et al., 2016 ; Mullane et al., 2014) ou à des analyses statistiques différentes (Simonds, Kieras, Rueda, & Rothbart, 2007). Pourtant, il y aurait une évolution du fonctionnement neurologique lors de la sollicitation du réseau du contrôle attentionnel. En effet, l'activité du gyrus cingulaire antérieur et du cortex préfrontal dorsolatéral serait différent chez les adultes et les enfants

(Konrad et al, 2005). Les adultes activeraient les réseaux neuronaux impliqués bilatéralement, alors que les enfants les activeraient plus dans l'hémisphère droit (Konrad et al., 2005). En résumé, le réseau du contrôle exécutif s'améliore avec l'âge, mais son développement reste encore mal connu.

#### **2.4. Lien entre les réseaux attentionnels et le haut potentiel intellectuel**

Le développement des capacités attentionnelles serait l'un des piliers essentiels au développement cognitif général de l'enfant (Johnson et al., 2003 ; Pascual-Leone, 1987 ; voir de Ribaupierre & Lecerf, 2017 pour une discussion). Dans cette perspective, les capacités intellectuelles seraient fortement liées au développement des capacités attentionnelles. La relation entre l'attention et l'intelligence a été abondamment étudiée (Burns, Nettelbeck, & McPherson, 2009 ; Cowan, Fristoe, Elliott, Brunner, & Saults, 2006 ; Schweizer & Moosbrugger, 2004 ; Schweizer et al., 2005 ; Tillman et al., 2009 ; Tourva, Spanoudis, & Demetriou, 2015). Cependant, ce lien semble être inconsistant dans la littérature (Schweizer et al., 2005). Ces résultats divergents peuvent s'expliquer par les différences au niveau de la méthodologie utilisée et des aspects de l'attention évalués (Burns et al., 2009 ; Schweizer & Moosbrugger, 2004). En effet, certains types d'attention joueraient un rôle important dans le fonctionnement de l'intelligence par rapport à d'autres. Cette différenciation au niveau des liens avec l'intelligence montrerait ainsi l'indépendance de chaque type d'attention (Schweizer & Moosbrugger, 2004).

Quelques études ont investigué la relation des capacités intellectuelles avec les 3 réseaux attentionnels, c'est-à-dire l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif. Parmi ces études, certaines ont été réalisées sur la relation du réseau d'alerte et les capacités intellectuelles. Konrad et collaborateurs (2005) n'ont pas observé de corrélation significative entre l'effet

d'alerte et le QI. Par ailleurs, la relation de l'intelligence et l'aspect intrinsèque du réseau d'alerte, c'est-à-dire l'attention soutenue (voir la section 2.1.1), a été beaucoup plus investiguée. Les résultats de ces études montrent que l'alerte intrinsèque interviendrait dans le déploiement des capacités intellectuelles (Schweizer & Moosbrugger, 2004 ; Schweizer, Zimmermann, & Koch, 2000). Shi et collaborateurs (2013) ont également montré que les enfants à haut potentiel intellectuel ont un meilleur contrôle de l'état de vigilance que leurs pairs. Cela signifie que les enfants à haut potentiel intellectuel sont capables très rapidement de focaliser leur attention et sont moins sensibles au phénomène d'inattention (Shi et al., 2013 ; Zhang, Zhang, He, & Shi, 2016). Le système d'orientation a aussi été investigué. L'effet d'orientation attentionnelle ne semble pas prédire les capacités intellectuelles (Konrad et al., 2005). Cependant, d'autres recherches ont constaté un lien entre l'aspect endogène de l'orientation, c'est-à-dire l'attention sélective (voir la section 2.1.2), et l'intelligence (Schweizer & Moosbrugger, 2004 ; Schweizer et al., 2005). Enfin, le contrôle exécutif semble être un important prédicteur des capacités intellectuelles (Cowan et al., 2006 ; Engle et al., 1999 ; Konrad et al., 2005 ; Tourva et al., 2015). Au niveau anatomique, les individus ayant des capacités intellectuelles élevées ont une activité neurologique plus importante au niveau des régions préfrontales latérales et pariétales (Gray, Chabris, & Braver, 2003). En effet, ce type d'activité cérébrale est impliqué dans le réseau du contrôle exécutif (Petersen & Posner, 2012). De surcroît, des études ont montré que les enfants à haut potentiel intellectuel avaient de meilleures performances au niveau du contrôle exécutif que leurs pairs appariés en âge chronologique (Calero et al., 2007 ; Duan et al., 2009 ; Johnson et al., 2003 ; Liu, Xiao, Shi, & Zhao, 2011a ; 2011b).



## **ARTICLE 2 - DEVELOPMENT OF ATTENTIONAL NETWORKS IN INTELLECTUALLY GIFTED CHILDREN**

La plupart des études ont exploré séparément différents aspects de l'attention des enfants à haut potentiel intellectuel. Peu d'études ont investigué simultanément les 3 réseaux attentionnels décrits par Posner et Petersen (1990 ; Petersen & Posner, 2012), c'est-à-dire l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif, chez cette population atypique. L'objectif de cet article est de s'intéresser aux trajectoires développementales des réseaux attentionnels chez les enfants à haut potentiel intellectuel.

Dans cette perspective, 54 enfants à haut potentiel intellectuel âgés de 8 à 14 ans, 54 enfants au développement typique âgés de 8 à 14 ans et 60 jeunes adultes âgés de 19 à 25 ans ont participé à cette étude. Le groupe d'enfants à haut potentiel intellectuel a été identifié par un IAG strictement supérieur à 125 aux échelles de Wechsler (WISC-IV) administrées par des psychologues libéraux ou par un score supérieur au 95e centile aux Matrices Progressives de Raven (Raven et al., 1998). Les enfants n'ayant pas de haut potentiel intellectuel ont été appariés en âge chronologique et avaient un score compris entre le 15e et le 85e centiles aux Matrices Progressives de Raven (Raven et al., 1998). Le groupe de jeunes adultes était composé d'étudiants en Licence à l'Université de Picardie Jules Verne. Aucun participant n'avait de trouble psychiatrique ou neurologique avéré. Tous les groupes ont réalisé la même procédure de l'Attention Network Test (ANT ; Figure 12).

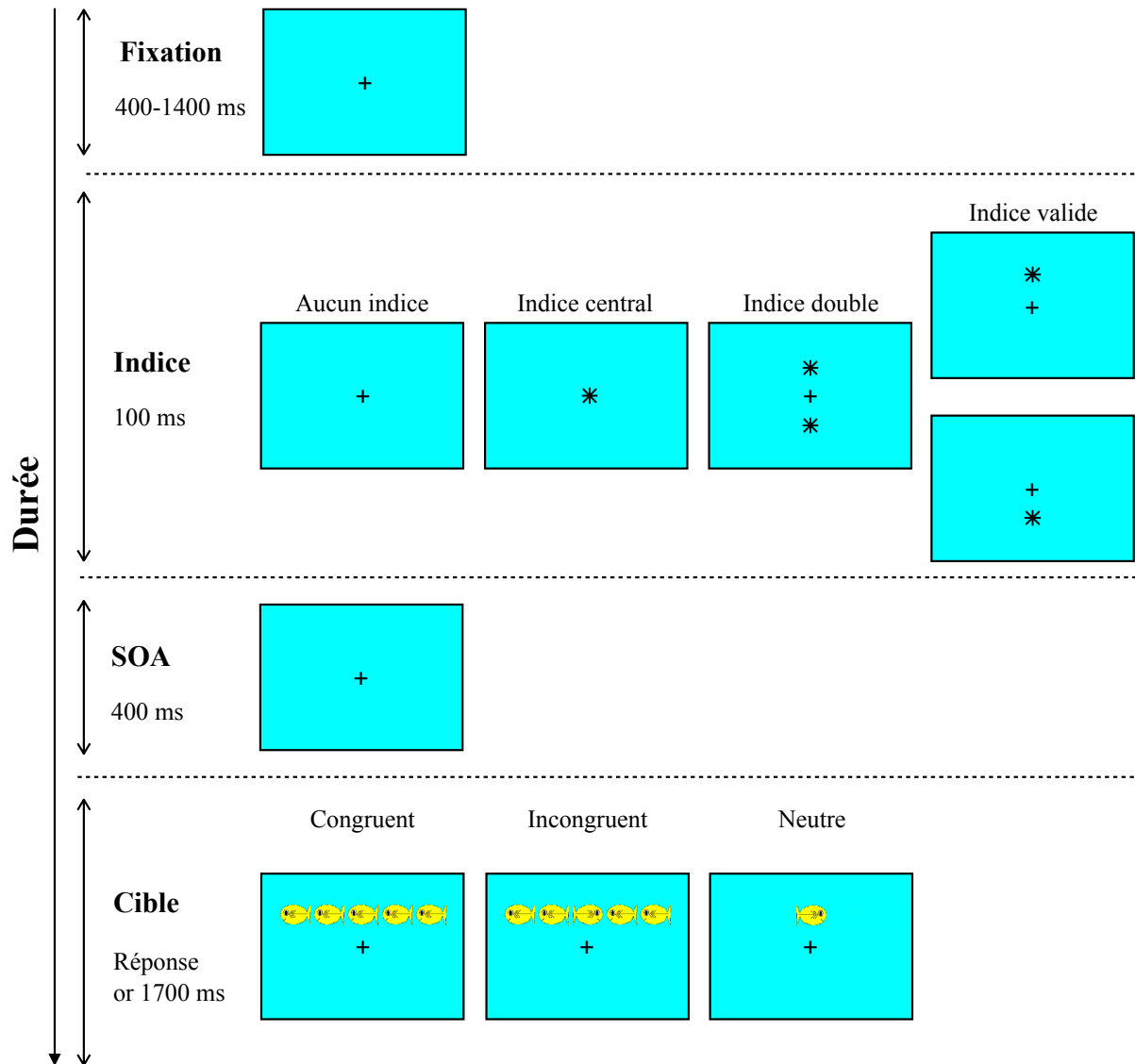


Figure 12 : Procédure de l'Attention Network Test (ANT).

À partir des performances de l'ANT, nous avons utilisé le Linear Integrated Speed-Accuracy Score (LISAS ; Équation 4 dans Vandierendonck, 2018) pour créer un score combinant le temps de réponse et le pourcentage d'erreurs. Ce type de score composite permet, d'une part, d'améliorer la détection des effets de différence de scores (Draheim et al., 2016 ; Hughes et al., 2013 ; Vandierendonck, 2017, 2018), et, d'autre part, de faciliter l'interprétation. Ainsi, plus le LISAS est élevé, moins le réseau attentionnel est efficace. Les scores composites ont été déterminés de la façon suivante : 1) le score d'alerte correspond à la soustraction des performances à la condition double indice à celles de la condition sans

indice ; 2) le score d'orientation correspond à la soustraction des performances à la condition avec l'indice valide marquant l'emplacement futur de la cible à celles de la condition avec l'indice central ; 3) le score du contrôle exécutif correspond à la soustraction des performances à la condition congruente à celles de la condition incongruente.

Nos résultats montrent que les enfants à haut potentiel intellectuel ne se distinguent pas au niveau des performances du réseau d'alerte. Leur état de vigilance ne semble pas être différent de celui de leurs pairs. Bien que les enfants à haut potentiel intellectuel ont une meilleure attention soutenue, c'est-à-dire l'alerte intrinsèque, que leurs pairs (Shi et al., 2013), ils ne semblent pas bénéficier davantage de l'indice impliquant le mécanisme phasique de l'alerte. Par ailleurs, les résultats confirment que l'effet d'alerte s'améliore lentement jusqu'à la fin de l'enfance (Mullane et al., 2014 ; Pozuelos et al., 2014 ; Rueda et al., 2004), voire jusqu'au début de l'adolescence (Lewis et al., 2016). Cette étude appuie l'idée d'une stabilisation des performances du réseau d'alerte à partir du début de l'adolescence jusqu'à l'âge adulte (Konrad et al., 2005). Contrairement à Pozuelos et collaborateurs (2014), nous n'avons pas observé d'amélioration des performances pour le réseau d'orientation durant l'enfance (Lewis et al., 2016 ; Mullane et al., 2014 ; Rueda et al., 2004). En revanche, nous avons trouvé une meilleure performance de l'effet d'orientation des jeunes adultes par rapport aux deux groupes d'enfants, indiquant une potentielle reprise du développement après le début de l'adolescence (Waszak et al., 2010). Cela indiquerait un développement non linéaire du réseau d'orientation (Waszak et al., 2010). Il y aurait donc des périodes critiques de développement se situant avant l'âge de 6 ans (Pozuelos et al., 2014 ; Rueda et al., 2004) et après l'âge de 14 ans. Concernant le réseau du contrôle exécutif, les enfants à haut potentiel intellectuel présentent de meilleures performances que leurs pairs. En d'autres termes, ils ont de meilleures capacités que leurs congénères, indépendamment de l'âge, à détecter des

anomalies et à gérer les interférences afin de résoudre des conflits. Nos résultats ne montrent aucune évolution significative des performances du contrôle exécutif de 8 à 14 ans, confirmant une stabilité de l'effet du contrôle exécutif durant cette période (Lewis et al., 2016 ; Mullane et al., 2014 ; Pozuelos et al., 2014 ; Rueda et al., 2004). Néanmoins, les 2 groupes d'enfants ont de plus faibles performances que les jeunes adultes, indiquant ainsi un développement après l'adolescence (Konrad et al., 2005). Le contrôle exécutif semble donc avoir des périodes critiques dans son développement (Lewis et al., 2016).

Cette présente étude s'est intéressée aux trajectoires développementales des réseaux attentionnels des enfants à haut potentiel intellectuel de l'enfance au début de l'adolescence. Or, la maturation des différents réseaux attentionnels se situe globalement à la fin de l'enfance. Il serait donc intéressant de poursuivre cette recherche avant cette période critique. Cependant, l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel est très difficile à réaliser avant l'âge scolaire. En effet, l'estimation du QI est plutôt stable qu'à partir de 7 ans (Schneider et al., 2014). Par conséquent, l'identification du haut potentiel intellectuel avant cet âge semble être très probabiliste. Les études longitudinales pourraient pallier ce problème et fournir des renseignements précieux sur les trajectoires développementales des réseaux attentionnels à cette période critique.

En résumé, le rythme développemental des réseaux d'alerte, d'orientation et de contrôle exécutif des enfants à haut potentiel intellectuel ne diffère pas significativement de celui de leurs pairs durant l'enfance jusqu'au début de l'adolescence. Cependant, le contrôle exécutif semble être une caractéristique importante dans le fonctionnement cognitif des enfants à haut potentiel intellectuel. Dans la littérature, le contrôle exécutif est considéré comme crucial dans le fonctionnement de la mémoire de travail, c'est-à-dire la capacité à traiter, manipuler

et stocker de brèves informations en cours d'activité cognitive (Engle et al., 1999 ; Kane, Bleckley, Conway, & Engle, 2001). Cette aptitude cognitive est fortement impliquée dans les performances scolaires (Alloway & Alloway, 2010 ; Gathercole, Pickering, Knight, & Stegmann, 2003) et le fonctionnement intellectuel (Ackerman et al., 2005). Les enfants à haut potentiel intellectuel présentent de performances élevées en mémoire de travail (Calero et al., 2007 ; Hoard, Geary, Byrd-Craven, & Nugent, 2008 ; Leikin, Paz-Baruch, & Leikin, 2013 ; van Viersen et al., 2014). Il serait donc intéressant d'investiguer le lien entre ces deux capacités essentielles dans le fonctionnement cognitif des enfants à haut potentiel intellectuel.

# Development of attentional networks in intellectually gifted children

Alexandre Aubry <sup>1</sup> and Béatrice Bourdin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Picardie Jules Verne, EA7273 CRP-CPO, Amiens, France

Soumis pour publication dans la revue *Gifted Child Quarterly*

Preprint disponible sur PsyArXiv, doi:10.31234/osf.io/fvcwz

Running title: Attention networks and gifted children

**Keywords:** Intellectual giftedness; Attention Networks Test; Executive control; Attentional development; Developmental trajectory

## **Abstract**

Intellectually gifted children (IGC) have high performance in many domains of the attention than intellectually average children (IAC). However, few studies investigated the development of the alerting, orienting and executive control networks, in IGC. The aim of our study is to analyze the development of these networks in IGC compared to typical developing children and young adults.

Fifty-four IGC (age range 8–14 years-old) were compared to 54 IAC (age range 8–14 years-old) and 60 young adults (age range 19–25 years-old) using the Attention Network Test (ANT) to assess these three attentional constructs. Results indicated IGC had better performance than IAC in executive control only. Both children groups have lower attentional network scores than young adults. IGC have probably the same development of the IAC in all attentional networks to the late childhood at adolescence. But they have better ability to focus volitionally in order to solve a simple conflict than IAC.

Intellectually gifted children (IGC) outperform in the most of the attentional tasks (Johnson, Im-Bolter, & Pascual-Leone, 2003; Shi, Tao, Chen, Cheng, Wang, & Zhang, 2013). Their attentional abilities seem to be more efficient than those of the intellectually average children. However, the development of their attentional abilities has been few investigated in the literature. Attention has a crucial role in the child's general cognitive development (Pascual-Leone, 1987; Johnson et al., 2003; see de Ribaupierre & Lecerf, 2017 for a discussion). Many studies assume IGC have a particular cognitive development (see Vaivre-Douret, 2011 for detailed discussion). Therefore, the aim of this current study is to investigate the development of the attentional abilities in children with intellectual giftedness.

IGC are usually defined by a highly intellectual potential with standardized test such as Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC; Wechsler, 2016) or sometimes with the Raven's Progressive Matrice (RPM, Raven, Delacourt & Raven, 2004) (see Cao, Jung, & Lee, 2017 for review). At school, these children are commonly classified with a high Intellectual Quotient (IQ; McClain & Pfeiffer, 2012; Vrignaud, Bonora, & Dreux, 2005). There is no consensus about the threshold of IQ score (Carman, 2013). However, the most of the special institutions take a cutoff score of 90th or 95th percentile from a standardized test (McClain & Pfeiffer, 2012; McIntosh, Dixon, & Pierson, 2012). Their high intellectual performance seems to be related to high abilities in the domain of attention (Calero, García-Martín, Jiménez, Kazén, & Araque, 2007; Duan, Shi, Wu, Mou, Cui, & Wang, 2009; Johnson et al., 2003; Liu, Xiao, Shi, & Zhao, 2011a; 2011b; Shi et al., 2013; Zhang, Zhang, He, & Shi, 2016).



The relationship between intellectual and attentional abilities has been investigated vastly (Burns, Nettelbeck, & McPherson, 2009; Cowan, Fristoe, Elliott, Brunner, & Sauls, 2006; Schweizer & Moosbrugger, 2004; Schweizer et al., 2005; Tillman et al., 2009; Tourva, Spanoudis, & Demetriou, 2015). In literature, the findings about the relationship between IQ and attention are inconsistent (Schweizer et al., 2005). This relation seems to be influenced by the type of attentional ability assessed (Burns et al., 2009; Schweizer & Moosbrugger, 2004). In other words, some attentional abilities seem to have more effect on the intellectual abilities than others. Indeed, attention is not an unitary concept. There is no consensus about the taxonomy of the attentional abilities. However, many imaging studies have shown specific aspects of attention are supported by particular neuronal networks (Posner & Petersen, 1990; see Petersen & Posner, 2012 for a recent review; Raz, 2004; Raz & Buhle, 2006). According to Posner and Petersen (1990), the attention system is composed of 3 attentional networks: 1) the alerting network is the ability to achieve and maintain a state of vigilance in a task (Posner & Rothbart, 2007). The alerting network allows to control the alertness during a period of time (i.e. sustained attention), and can improve the reacting of the individu after a warning signal (i.e. phasic alertness). The difference of performance between these cognitive mechanisms corresponds to the alerting effect (Raz & Buhle, 2006); 2) the orienting network is the ability to disengage the attention focus from a stimulus towards another. This attentional network allows to allocate the attentional resources rapidly towards a stimulus from an external signal (i.e. exogenous orienting), and also selects relevant information rapidly to process (i.e. selective attention). The orienting effect can be estimated by the difference in performance between these cognitive processes (Raz & Buhle, 2006); 3) the executive control

network is the ability to focus volitionally in order to solve a simple conflict (Posner & DiGirolamo, 1998). These executive processes are crucial for learning abilities and academic skills (Checa & Rueda, 2011; Posner & Rothbart, 2007). The mechanism of cognitive control is involved in the regulation of cognition and emotion (Simonds, Kieras, Rueda, & Rothbart, 2007; Rueda, Checa, & Rothbart, 2010). Usually, the executive control effect is estimated by the deviation from the performance in one condition without conflict to the one in another condition with a perception conflict (Raz & Buhle, 2006).

Some studies have investigated the relation of each attentional network with the intellectual abilities. The alerting effect seems not to be related to the IQ (Konrad et al., 2005). However, sustained attention, that is one facet of the alerting network, is involved in the intellectual performance (Schweizer, Zimmermann, & Koch, 2000; Schweizer, & Moosbrugger, 2004). The IGC have better allocate attentional resources and are less sensitive to attentional blindness than their pairs (Shi et al., 2013; Zhang et al., 2016). In the same vein, the orienting effect seems not to be linked to the IQ (Konrad et al., 2005). Nevertheless, some studies have shown a relation between the selective attention, that is the endogenous aspect of the orienting network, and the intellectual abilities (Schweizer et al., 2005; Schweizer & Moosbrugger, 2004). Furthermore, the executive control has an important role in the intellectual functioning (Cowan et al., 2006; Engle, 2018; Engle, Tuholski, Laughlin, & Conway, 1999). Some studies have shown the executive control effect is significantly correlated with the intellectual abilities and the age (Konrad et al., 2005; Tourva, et al., 2015).

In the literature, most of studies have highlighted the attentional networks don't grow in the same pace (Lewis, Reeve & Johnson, 2018; Pozuelos, Paz-Alonso,

Castillo, Fuentes, & Rueda, 2014; Rueda, Posner, Rothbart, & Davis-Stober, 2004; Mullane, Lawrence, Corkum, Klein, & McLaughlin, 2016). The alerting network continually develops from 6 and 12 years-old (Lewis et al., 2016; Mullane et al., 2016, Pozuelos et al., 2014; Rueda et al., 2004). However, the literature is less consistent about the extension of the alerting network development into young adulthood. Some authors have shown the efficiency of the alerting network get better until the early adulthood (Rueda et al., 2004), whereas other authors did not find a significant difference between children and young adults (Konrad et al., 2005). The efficiency of the orienting network increases from early childhood to 7 years-old (Mezzacappa, 2004). Then, most of the studies have shown stability in the performance of the orienting system (Lewis et al., 2016; Mullane et al., 2016; Rueda et al., 2004). In contrast, other studies have found the efficiency of the orienting network improves beyond the childhood (Konrad et al., 2005; Pozuelos et al., 2014). So, the growth of the orienting network would be well developed by the age of 7 years-old, and the orienting effect would improve slowly across the older children (Pozuelos et al., 2014). Finally, the executive control system develops mainly during the early childhood (Rueda, Posner, & Rothbart, 2005). The development of executive control network continues and extends beyond childhood to adulthood (Kray, Eber, & Linderberge, 2004; Davidson, Amso, Cruess, & Diamond, 2006; Diamond, 2013; Konrad et al., 2005; Rueda et al., 2004). All of these studies have shown each attentional network has a distinctive developmental trajectory and specific critical periods in its development.

A lot of studies have investigated the growth of these attentional networks in the children having atypically development such as children having an attentional deficit with/without hyperactivity disorder (ADHD; e.g., Adolfsdottir, Sorensen, &

Lundervold, 2008; Kratz, Studer, Malcherek, Erbe, Moll, & Heinrich, 2011; Mullane, Corkum, Klein, McLaughlin, & Lawrence, 2011), or bilingual children (e.g. Antón et al., 2014; Yang & Yang, 2016), or children with chromosome 22q11.2 deletion syndrome (e.g., Stoddard, Beckett, & Simon, 2010), or in the children with an high-functioning (e.g. Greene, Colich, Iacoboni, Zaidel, Bookheimer, & Dapretto, 2011). The IGC have some particularity in their cognitive development (see Vaivre-Douret, 2011 for a review). However, as far we know, no study has investigated the development of the attentional networks in children having a high intellectual potential. The aim of the current study is to investigate the developmental trajectory of each attentional network, i.e. alerting, orienting and executive control, in the IGC.

In this perspective, we performed our investigation of each attentional networks from IGC in two steps : 1) We compared the performance in each attentional network for IGC with young adults and children matched age; 2) then, we explored the cross-sectional developmental trajectories of each attentional network in IGC, and compared with those of their counterparts.

## **Methods**

### **Participants**

A sample of 54 IGC (mean age: 11.86 years, SD: 1.25 ; 22 females), 54 IAC (mean age: 11.84 years, SD: 1.25, 22 females) and 60 undergraduate students (mean age: 20.87 years, SD: 1.57, 50 females) participated in our study. No children had known learning disorders; all adults and children had normal or corrected vision, and all were native French speakers. All typical children were recruited in elementary and middle schools. IGC were recruited in help by licensed psychologists or special gifted

programs in middle school. The informations about our whole sample are summarized in Table 1. Children groups did not significantly differ in terms of age,  $t(106.00) = 0.101, p = .920, d = 0.019$ .

The inclusion criterion for children in the intellectually gifted group was General Aptitude Index (GAI) superior or equal to the 95th percentile with Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-IV; Wechsler, 2005) or with Raven’s Standard Progressive Matrices (RSPM; Raven, Raven, & Court, 1998). Thirty-four IGC had GAI superior or equal to 125 with WISC-VI, and 9 gifted children had a score superior or equal to 95th percentile with RSPM. In the intellectually average group, all children had an IQ between 85 and 115, estimated with RSPM only.

**Table 1: Description of the whole sample**

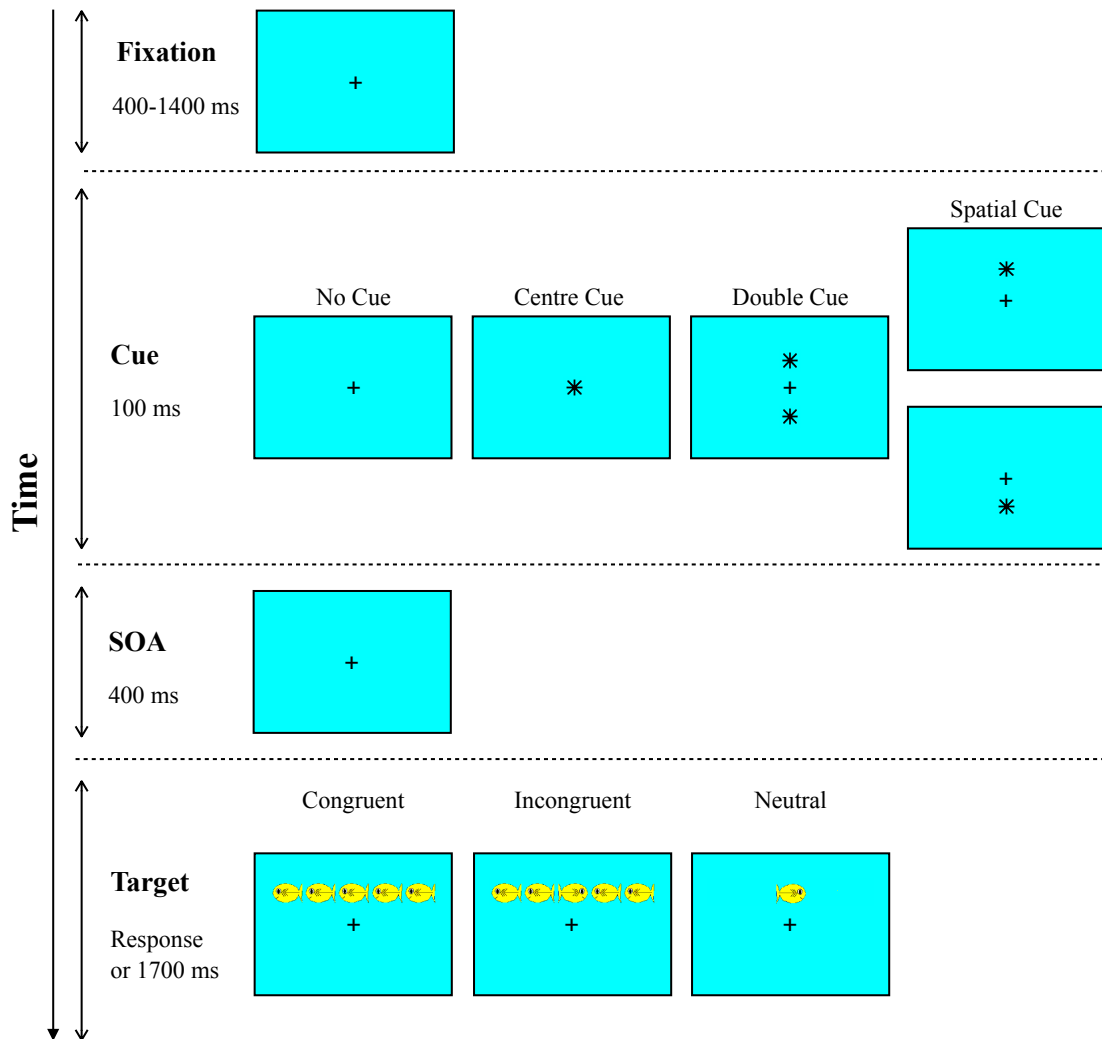
| Group        | n  | Gender<br>(% Female) | Age (in years)  |       |          | IQ               |      |          |
|--------------|----|----------------------|-----------------|-------|----------|------------------|------|----------|
|              |    |                      | M (SD)          | Skew  | Kurtosis | M (SD)           | Skew | Kurtosis |
| IAC          | 54 | 40.74                | 11.84<br>(1.25) | -0.33 | -0.03    | 103.44<br>(6.93) | 0.09 | -1.24    |
| IGC          | 54 | 40.74                | 11.86<br>(1.25) | -0.19 | -0.30    | 139.91<br>(8.09) | 0.09 | -0.53    |
| Young adults | 60 | 83.33                | 20.87<br>(1.57) | 1.21  | 1.13     | -                | -    | -        |

*Notes.* N = 168. IGC = Intellectually Gifted Children ; IAC = Intellectually Average Children.

### Measure

The *Attention Network Test - Child version* (ANT; Rueda et al., 2004) was used to assess the performance in 3 independent attentional networks simultaneously: alerting, orienting and executive control. The ANT was computerized using PsychoPy (Peirce, 2007; 2008). All stimuli of the task were downloaded from the author website at this address: [https://www.sacklerinstitute.org/cornell/assays\\_and\\_tools/ant/jin.fan/](https://www.sacklerinstitute.org/cornell/assays_and_tools/ant/jin.fan/).

The procedure of the task is presented in the Figure 1. The participant was instructed to indicate the direction of the central fish by pressing left or right button in the keyboard, the more rapidly possible without making error. A fixation cross was shown during a time randomly fixed between 400 and 1400 ms. Then, 1 of 4 cues was displayed on the screen during 100 ms : no asterisk was shown on the screen (no cue condition), an asterisk was appeared in the middle of the screen instead of the cross of fixation (central cue condition), an asterisk was displayed below and another above the cross of fixation (double cue condition) or the correct location of the target below or above the fixation cross was indicated at 100% by an asterisk (spatial valid cue condition). After a stimulus-onset asynchrony (SOA) fixed at 400 ms, the target was displayed on the screen : either a single fish above or below the fixation cross (i.e. neutral condition), or the middle fish in the same direction of 4 others (i.e. congruent condition), or the middle fish in the opposite direction of 4 others (i.e. incongruent condition). The target was presented until the participant's response or limit to 1700 ms. The task began a training block with 24 trials, including feedback for 500 ms. Then, the participants had to perform 288 trials without feedback divided into 3 experimental blocks of 96 trials each, with 5 s break between each block.



**Figure 1. Procedure for the Attention Network Test.**

For each participant, average accuracy and median response times (RTs) were recorded for each condition. RTs were considered only for correct trials; RTs faster than 200 ms or slower than 1700 ms were considered as extreme value and excluded from the computation (in average, 0.76 % of trials).

In the attentional network scores, the correlation between the response time and the rate of errors is usually positive (MacLeod et al., 2010). So, the response time and the rate of errors imply the same effect on the attentional system. The higher are the scores (i.e. RT or rate of errors), the more efficient is the attentional network. However, the response times and the rate of errors have usually low to moderate reliability

(MacLeod et al., 2010). In contrast, the combination of the speed and accuracy can improve the reliability of the measure (Hughes, Linck, Bowles, Koeth, & Bunting, 2013; Draheim, Hicks, & Engle, 2016; Vandierendonck, 2017; 2018). The linear integrated speed-accuracy score (LISAS, Vandierendonck, 2017; 2018) is computed by the integration of the response times and accuracy (Equation 1) for each condition. We can estimate thus the efficiency of each attentional networks with LISAS. Its interpretation is simply: more the value of LISAS is high, less attentional network is efficient.

$$\text{LISAS} = \text{RT}_{\text{Condition}} + \frac{\text{SD}_{\text{Overall RT}}}{\text{SD}_{\text{Overall PE}}} \times \text{PE}_{\text{Condition}} \quad (1)$$

where  $\text{RT}_{\text{Condition}}$  is the median of the response time in a specific condition ;  $\text{SD}_{\text{Overall RT}}$  is the standard deviation of the overall response time in the ANT ;  $\text{SD}_{\text{Overall PE}}$  is the standard deviation of the overall proportion of errors in the ANT ;  $\text{PE}_{\text{Condition}}$  is the rate of errors in a specific condition.

From this composite score of each condition, we computed the effect of each attentional network: 1) the alerting effect was computed by subtracting the no cue condition to the double cue condition; 2) the orienting effect was computed by subtracting the central cue condition to the spatial valid condition; 3) the executive control effect was computed by subtracting the incongruent condition to the congruent condition.

## **Procedure**

Signed informed consent was provided by all legal guardians. Before testing took place, the objectives of the study were explained to the children, who then gave oral



agreement for their participation. Informed consents signed by legal guardians were asked. Children and adults performed collectively the ANT tasks in around 20 minutes.

### **Data Analysis**

The data and R scripts needed to replicate the statistical analyses are available on the Open Science Framework platform at <https://osf.io/936dz/>. A first series of analyses examined whether the young adults, intellectually gifted and average groups differed in terms of overall attention measure and the 3 attentional networks performance. These analyses were performed based on the Analysis of Variance (ANOVA) with between-participant as the group. A second series of analyses were performed to investigate the cross-sectional developmental trajectory. So, we analyzed the trend of age effect of each attentional network performance for each group. We tested 3 trends: linear, quadratic and cubic trends. From the Aikaike Information Criteria and the analysis of deviance, we selected the best model explaining the age effect on the attentional performance for each group. Then, an Analysis of Covariance (ANCOVA) was performed with the age as covariate, the group as predictor and the interaction between the age and group to explore the developmental trajectory difference between the IGC and IAC. Finally, post-hoc tests were performed using Tukey's HSD for comparing the intellectually gifted and average children in function to their group of age. All effect sizes were computed using partial eta squared.

## Results

### Comparison between intellectually gifted children, intellectually average children, and young adults

#### Overall measures

The overall measures (i.e. the average of overall response time and the proportion of overall errors) from the ANT can provide information about the participant's attentional monitoring. Indeed, these indexes can inform on the speed and accuracy of the participant's overall response to changing task demands. The overall measures are presented for each group in Table 2.

One-way ANOVA was performed to compare the three groups on the average of overall response time. A main effect of the group was found significant,  $F(1, 2) = 31.17, p < .001, \eta^2 = 0.27$ . The Tukey's HSD post-hoc analysis showed the average of the overall response time in IGC,  $M = 633.5, SD = 86.09$ , was higher than the young adults,  $M = 544.91, SD = 52.35$ , but didn't differ significantly from the IAC,  $M = 641.78, SD = 78.71$ . Additionally, the average of the overall response time in both children groups was significantly higher than the young adult group.

Another one-way ANOVA was conducted for the proportion of overall errors. An arcsin transformation has been realized on the dependent variable in order to manage the heteroskedasticity (see Unsworth, Redick, Heitz, Broadway, & Engle, 2009 for similar problem). The three groups varied significantly on the proportion of overall errors,  $F(1, 2) = 34.33, p < .001, \eta^2 = 0.29$ . The Tukey's HSD post-hoc analysis indicated the IGC,  $M = 2.59, SD = 1.91$ , made more total errors than the young adults,  $M = 1.09, SD = 1.04$ , but less total errors than the IAC,  $M = 4.42, SD = 3.49$ .

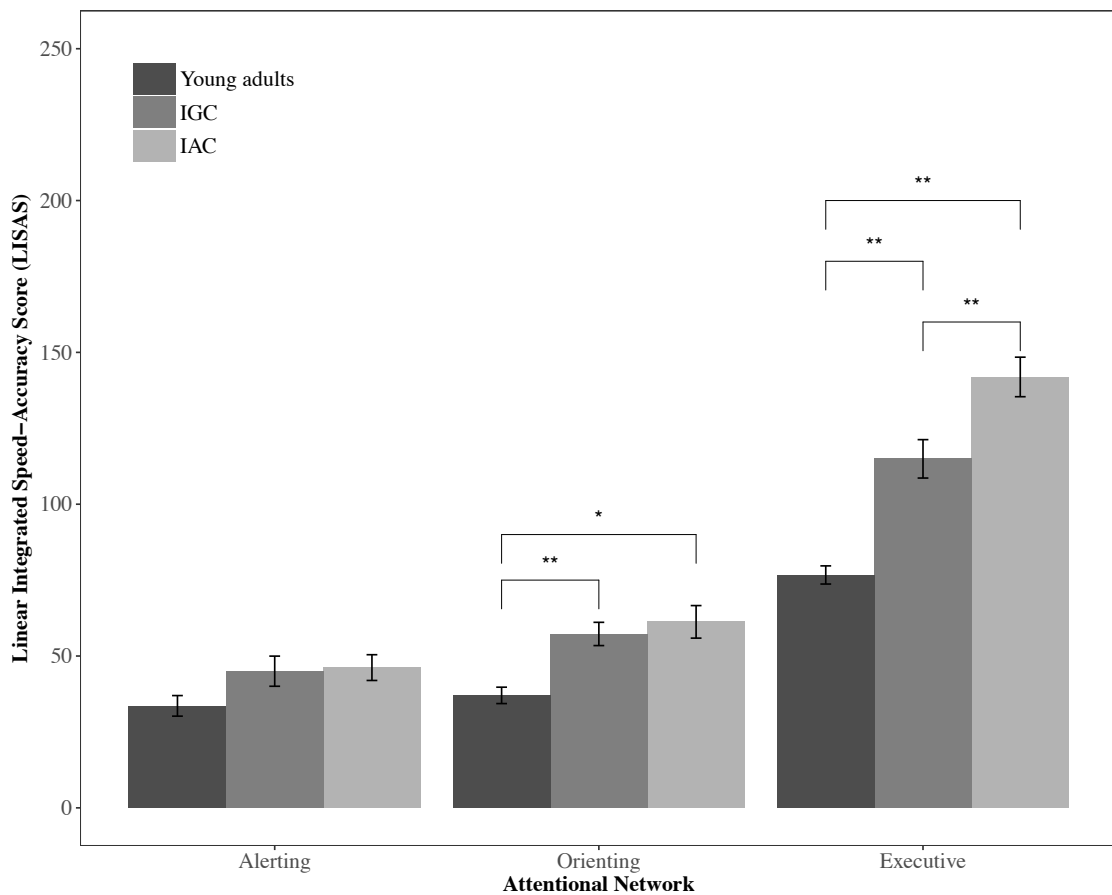
### **Attentional networks**

The attentional network scores are presented for each group in Table 2. Firstly, we expected the young adults to demonstrate significantly better alerting, orienting and executive attention performance than the two other groups. Secondly, we predicted too IGC to have significantly better only executive attention performance than typical children. This hypothesis was tested with a 3 x 3 repeated measures ANOVA with Group as between-subjects factor and Networks as within-subjects factor. An interaction effect Group x Networks was significantly found,  $F(4, 330) = 9.01, p < .001, MSE = 1287.12, \eta_p^2 = 0.10$ . In the alerting network, the post-hoc analysis with Tukey's HSD method indicated that the IGC,  $M = 27.45, SD = 44.62$ , didn't differ from the IAC,  $M = 38.59, SD = 35.74$ , nor from the young adults,  $M = 23.59, SD = 28.80$ . In the orienting network, the post-hoc analysis with Tukey method found that the IGC,  $M = 53.79, SD = 32.77$ , didn't differ from the IAC,  $M = 48.84, SD = 45.79$ , but had lower performance than the young adults,  $M = 31.46, SD = 25.44$ . Finally, in the executive control network the IGC,  $M = 114.94, SD = 46.47$ , had better performance than the IAC,  $M = 139.14, SD = 51.14$ , but had lower performance than the young adults,  $M = 76.70, SD = 23.17$ . The Figure 2 summarizes the results concerning the differences on the attentional network scores in function of the groups.

**Table 2 : Overall attention measures and attention networks performances by**

| ANT performance   |           | Young adults<br>(n = 60) |       |       | IGC<br>(n = 54)   |       |       | IAC<br>(n = 54)   |       |       |
|-------------------|-----------|--------------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
|                   |           | M (SD)                   | Skew  | Kurt  | M (SD)            | Skew  | Kurt  | M (SD)            | Skew  | Kurt  |
| Overall           | RT (ms)   | 544.91<br>(52.35)        | 0.62  | 1.48  | 633.50<br>(86.09) | 0.37  | -0.67 | 641.78<br>(78.71) | 0.11  | -0.04 |
|                   | Error (%) | 1.09<br>(1.04)           | 1.20  | 1.77  | 2.59<br>(1.91)    | 1.57  | 3.45  | 4.42<br>(3.49)    | 1.55  | 3.11  |
| Alerting          | LISAS     | 23.59<br>(28.80)         | 0.16  | -0.10 | 27.45<br>(44.62)  | -0.05 | -0.08 | 38.59<br>(35.74)  | -0.10 | 0.42  |
| Orienting         | LISAS     | 31.46<br>(25.44)         | -0.44 | 0.08  | 53.79<br>(32.77)  | -0.05 | 3.01  | 48.84<br>(45.79)  | -0.12 | 0.01  |
| Control executive | LISAS     | 76.70<br>(23.17)         | 0.25  | -0.75 | 114.94<br>(46.47) | 0.03  | -0.25 | 139.14<br>(51.14) | -0.22 | 0.13  |

**Notes.** IGC = Intellectually Gifted Children ; IAC = Intellectually Average Children.



**Figure 2. Score at each attentional network in function of group.**

## **Developmental trajectory of the attentional networks in intellectually gifted and average children**

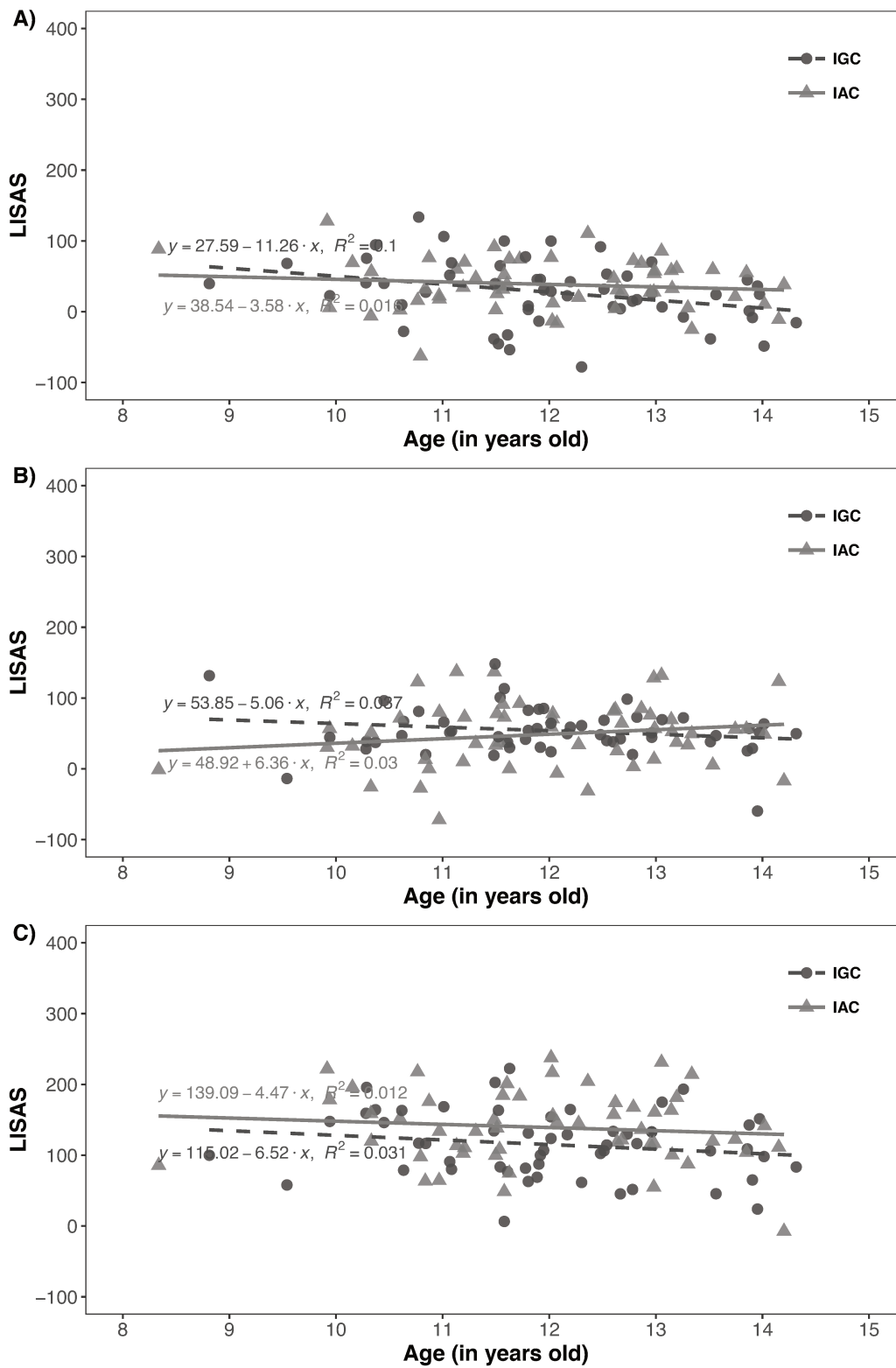
Cross-sectional developmental trajectories for all two groups were compared against the chronological age for each attentional network. For each attentional network score, an Analysis of Covariance (ANCOVA) was performed with the chronological age as the covariate and the group as the independent variable.

For the alerting network, a significant main effect of the chronological age was found,  $F(1, 104) = 5.88, p < .017, \eta_p^2 = 0.05$ . No main effect of group,  $F(1, 104) = 2.08, p = .152, \eta_p^2 = 0.02$ , nor interaction effect,  $F(1, 104) = 1.57, p = .213, \eta_p^2 = 0.01$ , were observed. In other words, both children groups have the same performance on the alerting network which grow with the same rate of development. The Figure 3.A represents graphically the developmental trajectory of the alerting effect for each group.

About the orienting network, the main effects of chronological age, and group ( $F_s < 1$ ), and the interaction effect,  $F(1, 104) = 3.46, p = .066, \eta_p^2 = 0.03$ , were not significant. For each children group, the developmental trajectory of orienting effect is illustrated at the Figure 3.B.

Regarding the executive control network, the main effect of chronological age,  $F(1, 104) = 2.10, p = .150, \eta_p^2 = 0.02$ , and the interaction effect,  $F(1, 104) = 0.07, p = .787, \eta_p^2 = 0.001$ , were not significantly found. On the contrary, the main effect of group was significantly found,  $F(1, 104) = 6.56, p = .012, \eta_p^2 = 0.06$ . Concretely, the IGC had better overall performance on the executive control network than the IAC, but

they had the same rate of development. The Figure 3.C shows the developmental trajectory of the IGC and the IAC on the executive control effect.



**Figure 3.** The developmental trajectories of the alerting (A), the orienting (B) and the executive control (C) in intellectually gifted children (IGC; dashed line) and intellectually average children (IAC; solid line).

## Discussion

Most of studies have shown IGC outperform at some domains of the attention, such as sustained attention (Shi et al., 2013) and controlled attention (Duan et al., 2009; Liu et al., 2011a; 2011b). The results of this current study provide additional information on the characteristics of the attentional development in IGC.

Our findings showed the IGC did not differ from the IAC on the speed of the attentional monitoring, but they were more accurate than the IAC for the whole attentional task. In accordance with the literature, we found the attentional monitoring improves with age (Konrad et al., 2005; Rueda et al., 2004). On the alerting effect, our results highlighted IGC did not differ from the performance of IAC or young adults. Their state of vigilance would not be disparate from those of their counterparts. In literature, IGC have better performance in sustained attention, i.e. the intrinsic aspect of the alerting (Shi et al., 2014). However, our study has shown they did not take advantage of the external warning involving the phasic mechanism of the alerting. In addition, our findings confirmed the alerting effect enhances slowly through the late childhood (Mullane et al., 2016; Pozuelos et al., 2014; Rueda et al., 2004), even until the early adolescence (Lewis et al., 2016). Both children groups did not differ from the young adults on the alerting effect, but they tended to have higher scores than young adults (Konrad et al., 2005). In this current study, we had no evidence of the improvement of alerting effect from late childhood to adulthood, but a slow and progressive development of the alerting effect can be possible (Pozuelos et al., 2014). Indeed, we found an improvement of alerting effect in older children regardless of their group (intellectually gifted or average children). On the orienting effect, the IGC seem to have the same efficiency as the IAC to disengage and to engage again the attention

focus towards a salient stimulus. We did not observe an increase in the orienting performance after the late childhood (Lewis et al., 2016; Mullane et al., 2016; Rueda et al., 2004). In contrast, we found a significant difference between both the children's groups and the young adults in the orienting effect. Thus, the orienting network seems to improve after adolescence (Konrad et al., 2004; Pozuelos et al., 2014; Waszak, Li, & Hommel, 2010). The orienting network would have critical periods of its development before the age of 6 years old (Pozuelos et al., 2014; Rueda et al., 2004) and after the age of 14 years old. On the executive control effect, we have an additional evidence that the IGC have better performance than the IAC (Calero et al., 2007; Duan et al., 2009; Johnson et al., 2003; Liu et al., 2011; 2011b). Our results showed the IGC had better efficiency than their pairs, to focus volitionally in order to solve a simple conflict. This study indicated no significant decrease in the control executive score from 8 to 14 years old. So, there is a stabilization of the control executive effect during this period (Lewis et al., 2016; Mullane et al., 2016; Pozuelos et al., 2014; Rueda et al., 2004). Nevertheless, both children groups differed from the young adults in executive control indicating an enhancement of this attentional system through adulthood (Konrad et al., 2005; Lewis et al., 2016; Pozuelos et al., 2014; Rueda et al., 2004). Our findings support the idea that the control executive has critical periods during its development (Lewis et al., 2016). In literature, executive control is considered as important in the functioning of working memory, naming the capacity to process, to manipulate and to storage briefly informations during a cognitive activity (Engle, Tuholski, Laughlin, & Conway, 1999 ; Kane, Bleckley, Conway, & Engle, 2001). This cognitive ability have strongly related to the intellectual capacities (Ackerman, Beier, & Boyle, 2005). Some studies have highlighted IGC have higher performance in



working memory than IAC (Calero et al., 2007; Hoard, Geary, Byrd-Craven, & Nugent, 2008; Leikin, Paz-Baruch, & Leikin, 2013; van Viersen, Kroesbergen, Slot, & de Bree, 2014). Future investigations might explore the relationship between working memory capacity and executive control in IGC.

### **Limitations of the Study**

This study is focused on the cross-sectional developmental trajectories of the attentional networks in IGC from late childhood to early adolescence. In typical development, these attentional network begins to enhance from early childhood and their enhancement decreases in late childhood (Mezzacappa, 2004; Rueda et al., 2004; Pozuelos et al., 2014). During the early childhood, we have no information about the rate of developmental trajectory of the attentional networks, particularly about the executive control performance, in IGC. There is a strong limitation in the identification of a highly intellectual potential before school age. The intellectual capacities seem to be more stable around 7 years-old (Schneider, Niklas, & Schmiedeler, 2014). So, the identification of the high intellectual potential before the scholar age would be very probabilistic. Longitudinal studies could pass this issue and allowing us to better understand the rate of the development of these attentional networks in IGC during these critical periods.

The child version of ANT was used to estimate the efficiency of each attentional network (Rueda et al., 2004). This task used only the spatially valid cue to assess the orienting effect. The use of invalid and valid cue can increase the orienting effect and to improve the observation of the development of orienting networks with the age (Abundis-Gutiérrez, Checa, Castellanos, & Rueda, 2014; Waszak et al., 2010).

In the current study, the design of this version of the ANT could not investigate the interaction between the attentional networks. In literature, some studies showed the presence of interactions between the attentional networks (Callejas, Lupiàñez, Funes, & Tudela, 2005; Pozuelos et al., 2014). These interactions modulate the efficiency of each attentional network, and the effect of this modulation is influenced by the child development (Mullane et al., 2016; Pozuelos et al., 2014). A modified ANT was created to investigate specifically these interactions (see Callejas, Lupiàñez, & Tudela, 2004 for details). In the future studies, the investigation of the interaction between networks can bring another perspective about the attentional development in IGC.

Despite being fun and game-like, the child version of ANT becomes quickly boredom for children (Ishigami & Klein, 2015), along with young adults. Boredom might affect the participant's engagement on the attentional task. Thus, the participant's performance could be underestimated in all conditions of this type of task. Some authors shown that it was possible to make a game-like tool assessing the attentional networks more engaging than the ANT (e.g. Klein, Hassan, Wilson, Ishigami, & Mulle, 2017).

## **Conclusion**

As far as we know, the current study is the first one to investigate the cross-sectional developmental trajectories of alerting, orienting and executive control networks in IGC. From late childhood to middle adolescence, our analyses indicated that the gradient of the development of each attentional networks in IGC was not distinguished from those of IAC. However, IGC had higher executive control performance than IAC. In literature, executive control plays a crucial role in the functioning of the working memory, i.e. the capacity to process, to manipulate and to store briefly information in

the current cognitive activity (Engle, Tuholski, Laughlin, & Conway, 1999; Kane, Bleckley, Conway, & Engle, 2001), and the intellectual functioning (Cowan et al., 2006). Thus, our finding confirms the executive control is an important cognitive characteristic in IGC.

#### **Declaration of Conflicting Interests**

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

## References

- Abundis-Gutiérrez, A., Checa, P., Castellanos, C., & Rueda, M. R. (2014). Electrophysiological correlates of attention networks in childhood and early adulthood. *Neuropsychologia*, *57*, 78–92. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2014.02.013
- Ackerman, P. L., Beier, M. E., & Boyle, M. O. (2005). Working Memory and Intelligence: The Same or Different Constructs? *Psychological Bulletin*, *131*, 30–60. doi:10.1037/0033-2909.131.1.30
- Adolfsson, S., Sorensen, L., & Lundervold, A. J. (2008). The attention network test: a characteristic pattern of deficits in children with ADHD. *Behavioral and Brain Functions*, *4*, 9. doi:10.1186/1744-9081-4-9
- Antón, E., Duñabeitia, J. A., Estévez, A., Hernández, J. A., Castillo, A., Fuentes, L. J., et al. (2014). Is there a bilingual advantage in the ANT task? Evidence from children. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1-12. doi:10.3389/fpsyg.2014.00398
- Assouline, S. G., Foley Nicpon, M., & Whiteman, C. (2009). Cognitive and Psychosocial Characteristics of Gifted Students With Written Language Disability. *Gifted Child Quarterly*, *54*, 102–115. doi:10.1177/0016986209355974
- Beljan, P., Webb, J. T., Amend, E. R., Web, N. E., Goerss, J., & Olenchak, F. R. (2006). Misdiagnosis and Dual Diagnoses of Gifted Children and Adults: ADHD, Bipolar, OCD, Asperger's, Depression, and Other Disorders. *Gifted and Talented International*, *21*, 83–86. doi:10.1080/15332276.2006.11673478
- Bramlett-Parker, J., & Washburn, D. (2016). Can Rhesus Monkey Learn Executive Attention? *Behavioral Sciences*, *6*(2), 1-15. doi:10.3390/bs6020011
- Burns, N. R., Nettelbeck, T., & McPherson, J. (2009). Attention and Intelligence: A Factor Analytic Study. *Journal of Individual Differences*, *30*, 44–57. doi:10.1027/1614-0001.30.1.44
- Calero, M. D., Belen, G.-M. M., & Robles, M. A. (2011). Learning Potential in high IQ children: The contribution of dynamic assessment to the identification of gifted children. *Learning and Individual Differences*, *21*, 176–181. doi:10.1016/j.lindif.2010.11.025
- Calero, M. D., García-Martín, M. B., Jiménez, M. I., Kazén, M., & Araque, A. (2007). Self-regulation advantage for high-IQ children: Findings from a research study. *Learning and Individual Differences*, *17*, 328–343. doi:10.1016/j.lindif.2007.03.012
- Callejas, A., Lupiáñez, J., Funes, M. J., & Tudela, P. (2005). Modulations among the alerting, orienting and executive control networks. *Experimental Brain Research*, *167*, 27–37. doi:10.1007/s00221-005-2365-z
- Callejas, A., Lupiáñez, J., & Tudela, P. (2004). The three attentional networks: On their independence and interactions. *Brain and Cognition*, *54*, 225–227. doi:10.1016/j.bandc.2004.02.012
- Canivez, G. L., Watkins, M. W., & Dombrowski, S. C. (2016). Factor structure of the Wechsler Intelligence Scale for Children–Fifth Edition: Exploratory factor analyses with the 16 primary and secondary subtests. *Psychological Assessment*, *28*, 975–986. doi:10.1037/pas0000238

- Cao, T. H., Jung, J. Y., & Lee, J. (2017). Assessment in Gifted Education: A Review of the Literature From 2005 to 2016. *Journal of Advanced Academics*, *28*, 163–203. doi:10.1177/1932202X17714572
- Carman, C. A. (2013). Comparing Apples and Oranges. *Journal of Advanced Academics*, *24*, 52–70. <http://doi.org/10.1177/1932202X12472602>
- Caropreso, E. J., & White, C. S. (1994). Analogical Reasoning and Giftedness: A Comparison Between Identified Gifted and Nonidentified Children. *The Journal of Educational Research*, *87*, 271–278. doi:10.1080/00220671.1994.9941254
- Checa, P., & Rueda, M. R. (2011). Behavioral and brain measures of executive attention and school competence in late childhood. *Developmental Neuropsychology*, *36*, 1018–1032. doi:10.1080/87565641.2011.591857
- Cowan, N., Fristoe, N. M., Elliott, E. M., Brunner, R. P., & Saults, J. S. (2006). Scope of attention, control of attention, and intelligence in children and adults. *Memory & Cognition*, *34*, 1754–1768. doi:10.3758/BF03195936
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, *44*, 2037–2078. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, *64*, 135–168. doi:10.1146/annurev-psych-113011-143750
- Draheim, C., Hicks, K. L., & Engle, R. W. (2016). Combining Reaction Time and Accuracy: The Relationship Between Working Memory Capacity and Task Switching as a Case Example. *Perspectives on Psychological Science*, *11*, 133–155. doi:10.1177/1745691615596990
- Duan, X., Shi, J., Wu, J., Mou, Y., Cui, H., & Wang, G. (2009). Electrophysiological correlates for response inhibition in intellectually gifted children: A Go/NoGo study. *Neuroscience Letters*, *457*, 45–48. doi:10.1016/j.neulet.2009.04.006
- Engle, R. W. (2018). Working Memory and Executive Attention: A Revisit. *Perspectives on Psychological Science*, *13*, 190–193. doi:10.1177/1745691617720478
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, *128*, 309–331. doi:10.1037/0096-3445.128.3.309
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the Efficiency and Independence of Attentional Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*, 340–347. doi:10.1162/089892902317361886
- Geake, J. G. (2008). High Abilities at Fluid Analogizing: A Cognitive Neuroscience Construct of Giftedness. *Roeper Review*, *30*, 187–195. doi:10.1080/02783190802201796
- Greene, D. J., Colich, N., Iacoboni, M., Zaidel, E., Bookheimer, S. Y., & Dapretto, M. (2011). Atypical neural networks for social orienting in autism spectrum disorders. *NeuroImage*, *56*, 354–362. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.02.031

- Hartnett, D. N., Nelson, J. M., & Rinn, A. N. (2004). Gifted or ADHD? The possibilities of misdiagnosis. *Roeper Review*, *26*, 73–76. doi:10.1080/02783190409554245
- Hoard, M. K., Geary, D. C., Byrd-Craven, J., & Nugent, L. (2008). Mathematical cognition in intellectually precocious first graders. *Developmental Neuropsychology*, *33*(3), 251–276. doi:10.1080/87565640801982338
- Hughes, M. M., Linck, J. A., Bowles, A. R., Koeth, J. T., & Bunting, M. F. (2013). Alternatives to switch-cost scoring in the task-switching paradigm: Their reliability and increased validity. *Behavior Research Methods*, *46*, 702–721. doi:10.3758/s13428-013-0411-5
- Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2015). Repeated Measurement of the Components of Attention With Young Children Using the Attention Network Test: Stability, Isolability, Robustness, and Reliability. *Journal of Cognition and Development*, *16*, 144–159. doi:10.1080/15248372.2013.803971
- Johnson, J., Im-Bolter, N., & Pascual-Leone, J. (2003). Development of Mental Attention in Gifted and Mainstream Children: The Role of Mental Capacity, Inhibition, and Speed of Processing. *Child Development*, *74*, 1594–1614. doi:10.1046/j.1467-8624.2003.00626.x
- Kane, M. J., Bleckley, M. K., Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (2001). A controlled-attention view of working-memory capacity. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*, 169–183. doi:10.1037//0096-3445.130.2.169
- Kapa, L. L., & Colombo, J. (2013). Attentional control in early and later bilingual children. *Cognitive Development*, *28*, 233–246. doi:10.1016/j.cogdev.2013.01.011
- Keith, T. Z., Fine, J. G., Taub, G. E., Reynolds, M. R., & Kranzler, J. H. (2006). Higher Order, Multisample, Confirmatory Factor Analysis of the Wechsler Intelligence Scale for Children—Fourth Edition: What Does It Measure? *School Psychology Review*, *35*, 108–127.
- Klein, R. M., Hassan, T., Wilson, G., Ishigami, Y., & Mulle, J. (2017). The AttentionTrip: A game-like tool for measuring the networks of attention. *Journal of Neuroscience Methods*, *289*, 99–109. doi:10.1016/j.jneumeth.2017.07.008
- Konrad, K., Neufang, S., Thiel, C. M., Specht, K., Hanisch, C., Fan, J., et al. (2005). Development of attentional networks: An fMRI study with children and adults. *NeuroImage*, *28*, 429–439. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.06.065
- Kranzler, J. H., Whang, P. A., & Jensen, A. R. (1994). Task Complexity and the Speed and Efficiency of Elemental Information Processing: Another Look at the Nature of Intellectual Giftedness. *Contemporary Educational Psychology*, *19*, 447–459. doi:10.1006/ceps.1994.1032
- Kratz, O., Studer, P., Malcherek, S., Erbe, K., Moll, G. H., & Heinrich, H. (2011). Attentional processes in children with ADHD: An event-related potential study using the attention network test. *International Journal of Psychophysiology*, *81*, 82–90. doi:10.1016/j.ijpsycho.2011.05.008
- Kray, J., Eber, J., & Lindenberger, U. (2004). Age differences in executive functioning across the lifespan: the role of verbalization in task preparation. *Acta Psychologica*, *115*, 143–165. doi:10.1016/j.actpsy.2003.12.001

- Leikin, M., Paz-Baruch, N., & Leikin, R. (2013). Memory abilities in generally gifted and excelling-in-mathematics adolescents. *Intelligence, 41*, 566–578. doi:10.1016/j.intell.2013.07.018
- Lewis, F. C., Reeve, R. A., & Johnson, K. A. (2016). A longitudinal analysis of the attention networks in 6- to 11-year-old children. *Child Neuropsychology, 24*, 145–165. doi:10.1080/09297049.2016.1235145
- Liu, T., Xiao, T., Shi, J., & Zhao, D. (2011a). Response preparation and cognitive control of highly intelligent children: a Go-Nogo event-related potential study. *Neuroscience, 180*, 122–128. doi:10.1016/j.neuroscience.2011.02.022
- Liu, T., Xiao, T., Shi, J., & Zhao, L. (2011b). Sensory gating, inhibition control and child intelligence: an event-related potentials study. *Neuroscience, 189*, 250–257. doi:10.1016/j.neuroscience.2011.05.009
- MacLeod, J. W., Lawrence, M. a, McConnell, M. M., Eskes, G. a, Klein, R. M., & Shore, D. I. (2010). Appraising the ANT: Psychometric and theoretical considerations of the Attention Network Test. *Neuropsychology, 24*, 637–651. doi:10.1037/a0019803
- McClain, M.-C., & Pfeiffer, S. (2012). Identification of Gifted Students in the United States Today: A Look at State Definitions, Policies, and Practices. *Journal of Applied School Psychology, 28*, 59–88. doi:10.1080/15377903.2012.643757
- McIntosh, D. E., Dixon, F. A., & Pierson, E. E. (2012). Use of Intelligence Tests in the Identification of Giftedness. In D. P. Flanagan & P. L. Harrison (Eds.), *Contemporary Intellectual Assessment Theories, Tests, and Issues* (pp. 623–642). New York, NY.
- Mezzacappa, E. (2004). Alerting, orienting, and executive attention: developmental properties and sociodemographic correlates in an epidemiological sample of young, urban children. *Child Development, 75*, 1373–1386. doi:10.1111/j.1467-8624.2004.00746.x
- Mullane, J. C., Corkum, P. V., Klein, R. M., McLaughlin, E. N., & Lawrence, M. A. (2011). Alerting, Orienting, and Executive Attention in Children With ADHD. *Journal of Attention Disorders, 15*, 310–320. doi:10.1177/1087054710366384
- Mullane, J. C., Lawrence, M. A., Corkum, P. V., Klein, R. M., & McLaughlin, E. N. (2016). The development of and interaction among alerting, orienting, and executive attention in children. *Child Neuropsychology, 22*, 155–176. doi:10.1080/09297049.2014.981252
- Pascual-leone, J. (1987). Organismic Processes for Neo-Piagetian Theories: A Dialectical Causal Account of Cognitive Development. *International Journal of Psychology, 22*, 531–570. doi:10.1080/00207598708246795
- Peirce, J. W. (2007). PsychoPy--Psychophysics software in Python. *Journal of Neuroscience Methods, 162*, 8–13. doi:10.1016/j.jneumeth.2006.11.017
- Peirce, J. W. (2008). Generating Stimuli for Neuroscience Using PsychoPy. *Frontiers in Neuroinformatics, 2*, 1-8. doi:10.3389/neuro.11.010.2008
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual Review of Neuroscience, 35*, 73–89. doi:10.1146/annurev-neuro-062111-150525

- Pfeiffer, S. I. (2011). Current Perspectives on the Identification and Assessment of Gifted Students. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 30, 3–9. doi:10.1177/0734282911428192
- Planche, P. (2000). Le fonctionnement et le développement cognitifs de l'enfant intellectuellement précoce [The cognitive functioning and development of gifted children]. *L'Année Psychologique*, 100(3), 503–525. doi:10.3406/psy.2000.28657
- Posner, M. I., & DiGirolamo, G. J. (1998). Executive attention: Conflict, target detection, and cognitive control. In R. Parasuraman (Ed.), *The Attentive Brain* (pp. 401-423). Cambridge, MA, US: The MIT Press
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25–42. doi:10.1146/annurev.ne.13.030190.000325
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2014). Attention to Learning of School Subjects. *Trends in Neuroscience and Education*, 3, 14–17. doi:10.1016/j.tine.2014.02.003
- Pozuelos, J. P., Paz-Alonso, P. M., Castillo, A., Fuentes, L. J., & Rueda, M. R. (2014). Development of attention networks and their interactions in childhood. *Developmental Psychology*, 50, 2405–2415. doi:10.1037/a0037469
- Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. 2000, updated (2004). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 3: The Standard Progressive Matrices*. San Antonio, TX: Harcourt Assessment.
- Raz, A. (2004). Anatomy of attentional networks. *The Anatomical Record*, 281B, 21–36. doi:10.1002/ar.b.20035
- Raz, A., & Buhle, J. (2006). Typologies of attentional networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 367–379. doi:10.1038/nrn1903
- Reynolds, M. R., Keith, T. Z., Flanagan, D. P., & Alfonso, V. C. (2013). A cross-battery, reference variable, confirmatory factor analytic investigation of the CHC taxonomy. *Journal of School Psychology*, 51, 535–555. doi:10.1016/j.jsp.2013.02.003
- de Ribaupierre, A., & Lecerf, T. (2017). Intelligence and Cognitive Development: Three Sides of the Same Coin. *Journal of Intelligence*, 5(2), 1–15. doi:10.3390/jintelligence5020014
- Rueda, M. R., Checa, P., & Rothbart, M. K. (2010). Contributions of Attentional Control to Socioemotional and Academic Development. *Early Education & Development*, 21, 744–764. doi:10.1080/10409289.2010.510055
- Rueda, M. R., Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Davis-Stober, C. P. (2004). Development of the time course for processing conflict: an event-related potentials study with 4 year olds and adults. *BMC Neuroscience*, 5(39), 1–13. doi:10.1186/1471-2202-5-39
- Schneider, W., Niklas, F., & Schmiedeler, S. (2014). Intellectual development from early childhood to early adulthood: The impact of early IQ differences on stability and change over time. *Learning and Individual Differences*, 32, 156–162. doi:10.1016/j.lindif.2014.02.001



- Schweizer, K., & Moosbrugger, H. (2004). Attention and working memory as predictors of intelligence. *Intelligence*, *32*, 329–347. doi:10.1016/j.intell.2004.06.006
- Schweizer, K., Moosbrugger, H., & Goldhammer, F. (2005). The structure of the relationship between attention and intelligence. *Intelligence*, *33*, 589–611. doi:10.1016/j.intell.2005.07.001
- Schweizer, K., Zimmermann, P., & Koch, W. (2000). Sustained attention, intelligence, and the crucial role of perceptual processes. *Learning and Individual Differences*, *12*, 271–286. doi:10.1016/S1041-6080(01)00040-1
- Shi, J., Tao, T., Chen, W., Cheng, L., Wang, L., & Zhang, X. (2013). Sustained Attention in Intellectually Gifted Children Assessed Using a Continuous Performance Test. *Plos One*, *8*(2), 1–8. doi:10.1371/journal.pone.0057417
- Simonds, J., Kieras, J. E., Rueda, M. R., & Rothbart, M. K. (2007). Effortful control, executive attention, and emotional regulation in 7–10-year-old children. *Cognitive Development*, *22*, 474–488. doi:10.1016/j.cogdev.2007.08.009
- Spearman, C. (1904). “General Intelligence,” Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology*, *15*, 201–292. doi:10.2307/1412107
- Sternberg, R. J., & Grigorenko, E. L. (2002). The Theory of Successful Intelligence as a Basis for Gifted Education. *Gifted Child Quarterly*, *46*, 265–277. doi:10.1177/001698620204600403
- Stoddard, J., Beckett, L., & Simon, T. J. (2010). Atypical development of the executive attention network in children with chromosome 22q11.2 deletion syndrome. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, *3*, 76–85. doi:10.1007/s11689-010-9070-3
- Tillman, C. M., Bohlin, G., Sorensen, L., & Lundervold, A. J. (2009). Intelligence and Specific Cognitive Abilities in Children. *Journal of Individual Differences*, *30*, 209–219. doi:10.1027/1614-0001.30.4.209
- Tourva, A., Spanoudis, G., & Demetriou, A. (2015). Cognitive correlates of developing intelligence: The contribution of working memory, processing speed and attention. *Intelligence*, *54*, 136–146. doi:10.1016/j.intell.2015.12.001
- Unsworth, N., Redick, T. S., Heitz, R. P., Broadway, J. M., & Engle, R. W. (2009). Complex working memory span tasks and higher-order cognition: a latent-variable analysis of the relationship between processing and storage. *Memory*, *17*, 635–654. doi:10.1080/09658210902998047
- Vaivre-Douret, L. (2011). Developmental and cognitive characteristics of “high-level potentialities” (highly gifted) children. *International Journal of Pediatrics*, *2011*, 1–14. doi:10.1155/2011/420297
- van Viersen, S., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Bree, E. H. (2014). High Reading Skills Mask Dyslexia in Gifted Children. *Journal of Learning Disabilities*, *49*, 189–199. doi:10.1177/0022219414538517
- Vrignaud, P., Bonora, D., & Dreux, A. (2005). Counselling the Gifted and Talented in France: Minimizing Gift and Maximizing Talent. *International Journal for the Advancement of Counselling*, *27*, 211–228. doi:10.1007/s10447-005-3182-6

- Waszak, F., Li, S.-C., & Hommel, B. (2010). The development of attentional networks: Cross-sectional findings from a life span sample. *Developmental Psychology, 46*, 337–349. doi:10.1037/a0018541
- Wechsler, D. (2016). *Manuel de l'Échelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants 5e édition [Manual for the Wechsler Intelligence Scale for Children – fifth edition]*. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Weiss, L. G., Keith, T. Z., Zhu, J., & Chen, H. (2013). WISC-IV and Clinical Validation of the Four- and Five-Factor Interpretative Approaches. *Journal of Psychoeducational Assessment, 31*, 114–131. doi:10.1177/0734282913478032
- Westlye, L. T., Grydeland, H., Walhovd, K. B., & Fjell, A. M. (2011). Associations between regional cortical thickness and attentional networks as measured by the attention network test. *Cerebral Cortex, 21*, 345–356. doi:10.1093/cercor/bhq101
- Winner, E. (2000). Giftedness: Current Theory and Research. *Current Directions in Psychological Science, 9*, 153–156. doi:10.1111/1467-8721.00082
- Yang, S., & Yang, H. (2016). Bilingual effects on deployment of the attention system in linguistically and culturally homogeneous children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology, 146*, 121–136. doi:10.1016/j.jecp.2016.01.011
- Yuan, Z., Qin, W., Wang, D., Jiang, T., Zhang, Y., & Yu, C. (2012). The salience network contributes to an individual's fluid reasoning capacity. *Behavioural Brain Research, 229*, 384–390. doi:10.1016/j.bbr.2012.01.037
- Zhang, H., Zhang, X., He, Y., & Shi, J. (2016). Inattentional Blindness in 9- to 10-Year-Old Intellectually Gifted Children. *Gifted Child Quarterly, 60*, 287–295. doi:10.1177/0016986216657158

### **3. LA CAPACITÉ DE LA MÉMOIRE DE TRAVAIL**

La mémoire de travail est habituellement définie comme l'activation concomitante du traitement et du stockage temporaire d'informations en cours d'activités cognitives (Just & Carpenter, 1992). Autrement dit, la capacité de la mémoire de travail serait le produit de l'interaction entre 2 systèmes cognitifs distincts : 1) un système de stockage d'informations à court terme ; 2) et un système permettant de traiter et de manipuler des informations durant une activité cognitive. Cet aspect dynamique de la mémoire de travail est lié à l'intervention des ressources attentionnelles de l'individu. En effet, l'implication forte de l'attention au cours de la mémorisation constitue la principale distinction avec le stockage temporaire et passif des informations, c'est-à-dire la mémoire à court terme. Bien que la plupart des auteurs soit en accord avec cette différenciation, il existe de nombreuses conceptualisations théoriques de la mémoire de travail (Baddeley, 2012 ; Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard, & Camos, 2009 ; Cowan, 2001). Ces modèles s'opposent principalement sur la nature et le fonctionnement des systèmes cognitifs impliqués dans la mémoire de travail. Au-delà de ces divergences théoriques, la plupart des auteurs admettent que la capacité de la mémoire de travail contribue de manière importante dans le fonctionnement cognitif global de l'individu.

La mémoire de travail joue un rôle crucial dans le fonctionnement de l'intelligence (Ackerman et al., 2005 ; Chuderski, 2013 ; Cornoldi & Giofrè, 2014 ; Giofrè, Mammarella, & Cornoldi, 2013 ; Kane et al., 2005). Plus précisément, les performances en mémoire de travail sont fortement liées aux performances intellectuelles estimées par des évaluations standardisées. Dans la littérature, les

enfants à haut potentiel intellectuel présentent des performances élevées dans les tâches de mémoire de travail (Calero et al., 2007 ; Hoard et al., 2008 ; Leikin et al., 2013 ; van Viersen et al., 2014). Ces études confirment ainsi l'importance de la mémoire de travail dans le déploiement du potentiel intellectuel.

La capacité de la mémoire de travail est également impliquée dans les apprentissages. Les performances en mathématiques (voir Friso-van den Bos, van der Ven, Kroesbergen, & van Luit, 2013 pour une méta-analyse) et en compréhension de la lecture (Daneman & Carpenter, 2008) sont fortement tributaires de cette capacité cognitive. Des performances déficitaires en mémoire de travail sont souvent associées à la présence d'un trouble des apprentissages chez l'enfant (Alloway, 2009 ; voir Peng & Fuchs, 2014 pour une récente méta-analyse ; Swanson, Xinhua Zheng, Jerman, 2009). De même, elle semble être affectée chez les enfants à haut potentiel intellectuel ayant un trouble des apprentissages, décrit comme des enfants « doublement exceptionnels » (*twice exceptional children*, en anglais). Ces enfants présentent de moindres performances en mémoire de travail par rapport aux autres enfants à haut potentiel intellectuel (Fugate, Zentall, & Gentry, 2013 ; van Viersen et al., 2014). Cependant, la capacité de la mémoire de travail semble moduler la gravité de l'expression symptomatique des troubles des apprentissages (van Viersen et al., 2014). Le niveau de performance en mémoire de travail serait un facteur de compensation pouvant parfois masquer les difficultés d'apprentissage chez les enfants « doublement exceptionnels ». En résumé, la capacité de la mémoire de travail est essentielle dans le déploiement des capacités d'apprentissage chez l'enfant en général, et également chez l'enfant à haut potentiel intellectuel.

Au regard de l'importance du lien de la mémoire de travail avec les capacités intellectuelles et d'apprentissage, l'investigation de son fonctionnement chez les enfants à haut potentiel intellectuel semble pertinente et importante dans l'adaptation à leurs besoins éducatifs. Or, peu d'études ont exploré le fonctionnement de leur capacité de la mémoire de travail. Par ailleurs, les outils habituels d'évaluation de la mémoire de travail ne sont pas spécialement adaptés pour estimer cette capacité cognitive chez les enfants à haut potentiel intellectuel (Vock & Holling, 2008). Comme avec les tests classiques d'intelligence, ces enfants atteignent facilement un score maximal aux tâches habituelles de mémoire de travail (Vock & Holling, 2008). Par conséquent, une réflexion sur l'évaluation de ce type de performance doit être réalisée chez les enfants à haut potentiel intellectuel. L'objectif de cette troisième et dernière partie est de discuter de l'évaluation de la mémoire de travail dans les études développementales impliquant les enfants à haut potentiel intellectuel, et d'investiguer les raisons de leurs performances élevées à ce type de tâche.

### **3.1. Conceptions théoriques**

La mémoire de travail a été conceptualisée par de nombreux modèles théoriques. La plupart de ces conceptions s'accordent sur l'aspect dynamique de la mémoire de travail, c'est-à-dire l'alternance entre le traitement et le stockage temporaire de l'information au cours d'une activité cognitive. La divergence entre ces modèles théoriques concerne principalement la structure et le fonctionnement de la mémoire de travail. Ces différents modèles peuvent se situer sur un continuum allant d'une conception modulaire (Baddeley, 2012 ; Baddeley & Hitch, 1974) vers une conception unitaire de la mémoire de travail (Cowan, 2001). D'autres modèles théoriques récents

se placent à l'intérieur de ce continuum. Certains d'entre eux se focalisent essentiellement sur l'implication de processus cognitifs comme les ressources attentionnelles et la vitesse de traitement dans le fonctionnement et le développement de la mémoire de travail (par ex. Barrouillet et al., 2009). De part et d'autre de ce continuum, les 2 modèles théoriques extrêmes (c.-à-d. le modèle modulaire et celui unitaire de la mémoire de travail) ont influencé pendant plusieurs décennies la littérature sur la mémoire de travail. Ils ont été éprouvés expérimentalement et comparés à de nombreuses reprises (par ex. Gray et al., 2017 ; Hale et al., 2011 ; Hornung, Brunner, Reuter, & Martin, 2011).

### **3.1.1. Modèle des composants multiples**

Le modèle des composants multiples proposé par Baddeley et collaborateurs (Baddeley & Hitch, 1974 ; Baddeley, 2012 ; Logie, 2011) décrit la mémoire de travail comme un système modulaire (voir Figure 13). Au départ, le modèle comportait 3 systèmes indépendants (Baddeley & Hitch, 1974) : la boucle phonologique (*phonological loop*, en anglais), le calepin visuospatial (*visuospatial sketchpad*, en anglais) et l'administrateur central (*central executive*, en anglais). Ces différents systèmes auraient une relation hiérarchique (Baddeley & Hitch, 1974). La boucle phonologique et le calepin visuospatial sont conçus comme des systèmes dits « esclaves » permettant le rafraîchissement des informations (verbales ou visuospatiales) retenues temporairement. L'administrateur central est considéré comme un système dit « maître », car il supervise et coordonne le fonctionnement de ces 2 systèmes esclaves par le biais des capacités attentionnelles.

Le modèle des composants multiples stipule l'existence de 2 espaces de stockage restreint et de manipulation temporaire dédiés à des modalités de stimuli spécifiques. La boucle phonologique est l'un des ces 2 espaces. Elle traite exclusivement des informations issues de la modalité verbale, et elle maintient ce type d'informations par le biais d'un mécanisme d'autorépétition vocale et subvocale (Baddeley, 2012). L'autre espace correspond au calepin visuospatial, qui permet de stocker brièvement des informations de nature visuelle ou/et spatiale (Baddeley, 2012). Ce système non verbal a, lui aussi, un rôle de maintien de ce type d'information. En effet, Logie (2011) a proposé une distinction entre la mémorisation à court terme des informations visuelles avec la fonction de cache visuel (*visual cache*, en anglais), et le maintien des informations spatiales avec l'autorépétition mentale de courtes séquences de mouvements par la fonction du transcritteur intérieur (*inner scribe*, en anglais). Cependant, la nature de cette autorépétition visuospatiale reste encore indéterminée (Baddeley, 2012). En résumé, la boucle phonologique et le calepin visuospatial sont des systèmes cognitifs de stockage limité et de maintien temporaire d'informations d'une certaine modalité (verbale *versus* visuospatiale). Le modèle des composants multiples affirme donc une différenciation de la mémoire de travail selon la modalité des stimuli à traiter (Alloway, Gathercole, & Pickering, 2006 ; Gathercole et al., 2004). Concrètement, il y aurait une mémoire de travail visuospatiale et une autre verbale selon le modèle des composants multiples.

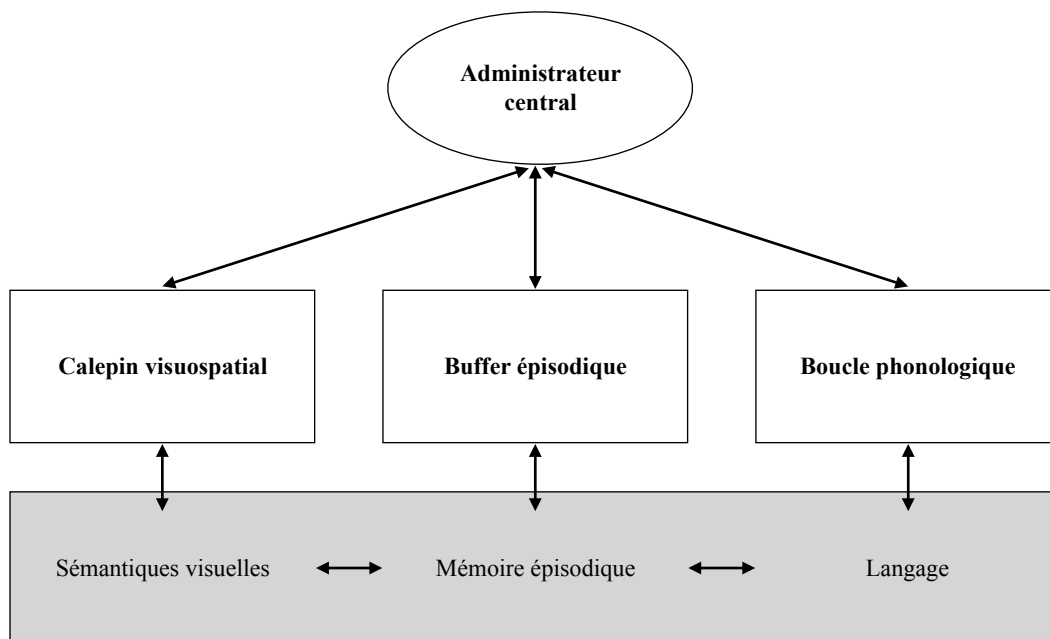
L'administrateur central est essentiel dans le fonctionnement de la mémoire de travail. Il est constitué de plusieurs fonctions exécutives telles que l'attention soutenue, l'attention focalisée, l'attention divisée, la flexibilité cognitive, la mise à jour et l'inhibition (Baddeley, 2012 ; Logie, 2011 ; Miyake, Friedman, Emerson, Witzki,

Howerter, & Wager, 2000). L'administrateur central est un système purement attentionnel (Baddeley, 2012). Par conséquent, il ne peut pas stocker d'informations. En d'autres termes, l'administrateur central coordonne et supervise uniquement le traitement et la manipulation des informations entrantes effectuées par l'un ou l'autre système esclave, selon la modalité de ces informations (verbale ou visuospatiale). Or, les stimulations sont habituellement perçues et traitées sous la forme de plusieurs modalités. Par exemple, la lecture de mots exige l'extraction d'informations écrites (visuelles) suivi d'un traitement des représentations phonologiques et sémantiques (verbales) des mots lus. Les informations visuelles et phonologiques peuvent être simultanément traitées lors de la présentation d'un stimulus complexe tel qu'un mot écrit. Les modalités de présentation des stimuli sont très souvent combinées dans le processus de mémorisation (Logie et al., 2000). Ainsi, le nombre d'informations à maintenir dépasse de loin les contraintes de stockage de ces systèmes esclaves, c'est-à-dire la boucle phonologique et le calepin visuospatial. De plus, le lien entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme reste insuffisamment expliqué par ces 2 systèmes esclave. Fort de ces constats, Baddeley (2000) a été incité à concevoir un nouveau composant permettant d'expliquer l'intégration, le stockage et la manipulation d'informations multimodales, ainsi que le lien entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme.

Ce quatrième composant correspond au buffer épisodique (Baddeley, 2000). Il permet de réaliser un stockage tampon entre les informations issues de la boucle phonologique et du calepin visuospatiale. Le buffer épisodique n'est pas tributaire de la modalité des informations entrantes. Ainsi, il peut faire le lien entre la mémoire de travail et les différentes perceptions sensorielles (Baddeley, 2012). Ce quatrième et



dernier composant a pour objectif d'intégrer les différentes informations multimodales dans un espace de stockage et de traitement temporaire. Il joue également un rôle d'interface avec la mémoire à long terme de type épisodique et sémantique. En résumé, le buffer épisodique est un espace limité où des informations multidimensionnelles peuvent être traitées temporairement, et il fait le lien entre la mémoire de travail et la mémoire à long-terme (Baddeley, 2012).



**Figure 13. Le modèle des composants multiples de la mémoire de travail d'après Baddeley (2000).**

En conclusion, le modèle des composants multiples est l'une des premières conceptions théoriques à distinguer la mémoire à court terme de la mémoire de travail. Il permet d'appréhender l'aspect limité et dynamique de la mémoire de travail. Ce modèle détaille également ses caractéristiques et ses fonctions spécifiques. Cette conceptualisation perçoit la mémoire de travail comme un système contraint non seulement par une capacité attentionnelle limitée, mais aussi par une combinaison de systèmes cognitifs ayant également une capacité limitée (Logie, 2011). Le travail en

synergie de l'administrateur central, des 2 systèmes esclaves (c.-à-d. la boucle phonologique et le calepin visuospatial) et du buffer épisodique est essentiel pour répondre aux exigences d'une tâche cognitive, telle que la lecture. Depuis 45 ans, le modèle des composants multiples a été utilisé à de nombreuses reprises du fait de sa simplicité d'évaluation des différents systèmes pouvant être impliqués dans différents domaines, comme la boucle phonologique pour le langage. Il a également fait réagir par l'émergence d'autres modèles théoriques comme le modèle des processus intégrés de la mémoire de travail (Cowan, 1988 ; 2001).

### **3.1.2. Modèle des processus intégrés**

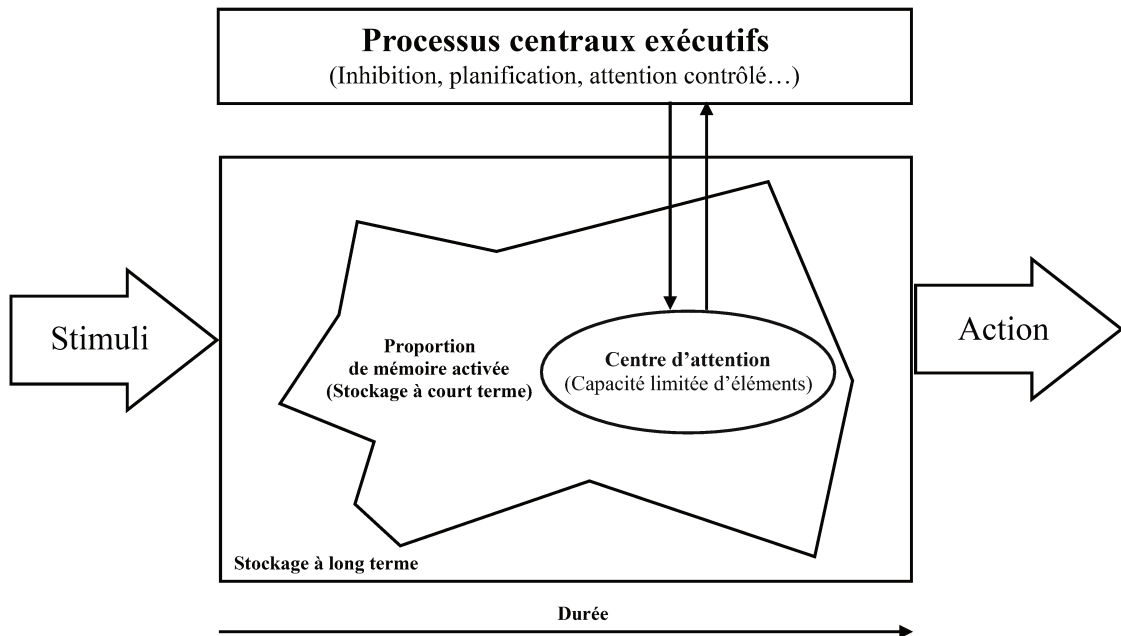
Le modèle des processus intégrés de Cowan (1988 ; 2001) se focalise principalement sur l'implication des capacités attentionnelles dans le fonctionnement de la mémoire de travail. Elle correspondrait à la capacité à maintenir une quantité limitée d'informations brièvement disponibles pour être traitées de manière continue (Cowan, 2017). Le modèle des processus intégrés conçoit donc la mémoire de travail comme l'activation temporaire d'informations multimodales issues de la mémoire à long terme par le biais d'un centre d'attention (*focus of attention*, en anglais ; voir Figure 14). Ce modèle différencie la mémoire à court terme de la mémoire à long terme par l'activation temporaire des informations disponibles. Il distingue également la mémoire de travail de la mémoire à court terme par le nombre plus restreint de représentations actives durant une tâche cognitive (Cowan, 2001). Contrairement au modèle des composants multiples, la mémoire de travail serait vue comme un tout cohérent liant les systèmes mnésiques (c.-à-d. la mémoire à long terme et la mémoire à court terme) et les capacités attentionnelles. Elle serait limitée par le centre d'attention

ou l'étendue de l'attention (*scope of attention*, en anglais). Ce système attentionnel délimite ainsi un espace mnésique d'un nombre limité de représentations accessibles à l'individu. En résumé, le modèle des processus intégrés considère la proportion active de la mémoire à long terme comme étant de la mémoire à court terme, et le centre d'attention comme étant la principale caractéristique de la mémoire de travail (Engle et al., 1999).

Selon Cowan (1988 ; 2001), seul le centre d'attention est limité par un nombre restreint d'éléments actifs et accessibles. La limite du nombre d'éléments retenus par le centre d'attention est liée à la notion de regroupement (*chunk*, en anglais). Elle correspond à la plus petite unité d'éléments ou de représentations regroupées ayant un sens. Par exemple, une suite de 12 lettres est présentée et doit être mémorisée : B-T-S-O-N-G-V-I-H-E-D-F. Cette suite de lettres peut être regroupée en 4 sigles très connus en France : B.T.S., O.N.G., V.I.H., E.D.F.. Grâce à ses connaissances en mémoire à long terme, l'individu peut ainsi retenir 4 items (c.-à-d. 4 sigles de 3 lettres) en réalisant ce type de regroupement (*chunk*) au lieu de 12 items (c.-à-d. 12 lettres). La mémoire à long terme serait donc inéluctablement impliquée dans le fonctionnement de la mémoire à court terme et dans celui de la mémoire de travail. Toutefois, des stimuli tout à fait nouveaux peuvent directement accéder au centre d'attention et solliciter de manière importante les ressources attentionnelles de l'individu.

Selon le modèle des processus intégrés, les mécanismes de stockage sont unitaires et ne se divisent pas en plusieurs composants (verbal et visuospatial). Ce modèle théorique considère que ces mécanismes de stockage ne sont pas limités en termes de nombres d'éléments retenus, et peuvent rester disponibles sans l'intervention des

capacités attentionnelles. Cependant, la disponibilité de ces éléments retenus est limitée par le temps d'activation lorsqu'ils ne sont pas au sein du centre d'attention (Cowan, 2001).



**Figure 14. Le modèle des processus intégrés de la mémoire de travail d'après Cowan (1988).**

Dans le stockage à court terme, les éléments activés temporairement sont sensibles à la dégradation temporelle. Leur rappel peut être également perturbé par des interférences de type rétroactif et proactif (Cowan, 2001). En d'autres termes, sans l'intervention de mécanismes de maintien, les éléments anciennement activés peuvent parasiter les éléments récemment accessibles (c.-à-d. l'interférence rétroactive) ; ou à l'inverse, les éléments nouvellement activés peuvent perturber les éléments précédemment disponibles (c.-à-d. l'interférence proactive). L'utilisation de stratégies mnésiques comme l'autorépétition et la sollicitation d'un rafraîchissement attentionnel continu peuvent pallier cette dégradation temporelle et ces différents types d'interférence lors de la mémorisation (Cowan, 2001). Cependant, ces mécanismes de

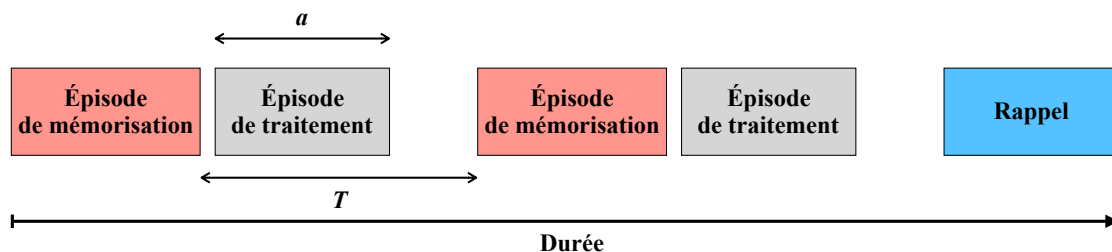
récupération demandent une alternance entre le traitement et la mémorisation des informations en cours. Cette alternance prend du temps et a tendance à contribuer à la détérioration des informations activées en mémoire de travail (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004). Forts de ce constat, d'autres modèles théoriques se sont focalisés sur le mécanisme lié à cette détérioration des informations en cours de mémorisation. Le modèle de partage temporel des ressources (Barrouillet et al., 2004) est l'un de ces modèles théoriques s'intéressant au mécanisme d'alternance entre les processus de traitement et de stockage dans la mémoire de travail.

### **3.1.3. Modèle de partage temporel des ressources**

Le modèle de partage temporel des ressources (*time-based resource sharing model*, en anglais) a apporté une récente précision concernant le temps de dégradation des informations au sein de la mémoire de travail (Barrouillet et al., 2004 ; Camos & Barrouillet, 2014). Selon ce modèle théorique, le traitement et le maintien temporaire des informations reposent sur une ressource limitée, c'est-à-dire l'attention. Ce système attentionnel est un processus volontaire partagé entre le maintien et le traitement de l'information en cours d'activité cognitive. Cette ressource attentionnelle doit donc être partagée avec la nécessité de maintenir le but de l'activité en cours et les résultats intermédiaires, de sélectionner fréquemment les informations pertinentes et de récupérer des informations en mémoire à long terme. Le partage de cette ressource limitée est indispensable afin de réaliser une tâche complexe telle que la lecture. Ainsi, le modèle de partage temporel des ressources postule que le traitement et le maintien de l'information se réalisent de manière séquentielle (Camos & Barrouillet, 2014). Chaque processus constitue un épisode du traitement dans la mémoire de travail. Cette

limitation liée à la séquentialité des épisodes de traitement crée un goulet d'étranglement (*central bottleneck*, en anglais) de la capacité de la mémoire de travail (Camos & Barrouillet, 2014).

Un temps de latence subsiste entre le traitement et le maintien de l'information durant une activité cognitive (Voir Figure 15). Lors de cette courte pause, un rafraîchissement attentionnel s'opère afin de garder les informations actives en cours de mémorisation (Camos & Barrouillet, 2014a). Cependant, ce laps de temps entre 2 épisodes de mémorisation ( $T$ ) est également alloué à l'épisode de traitement, sollicitant ainsi l'attention. Plus le temps accordé à cet épisode de traitement est long, moins l'élément mémorisé bénéficie du rafraîchissement attentionnel. Par conséquent, le ratio de la durée de l'épisode de traitement, impliquant la sollicitation de l'attention, sur le temps total accordé entre 2 épisodes de mémorisation constituerait donc une charge cognitive (Barrouillet et al., 2004 ; Barrouillet & Camos, 2014 ; voir Figure 15).



**Figure 15. Schéma du déroulement d'une tâche de mémoire de travail impliquant des épisodes de traitement et de mémorisation.** Le paramètre  $T$  correspond au laps de temps entre 2 épisodes de mémorisation. Le paramètre  $a$  correspond à la durée de l'épisode de traitement. Selon le modèle de partage temporel des ressources, la charge cognitive est égale à  $\frac{a}{T}$ .

Le maintien actif des informations en cours de mémorisation est tributaire de la charge cognitive. Concrètement, plus la charge cognitive est élevée, moins les informations restent actives. Ainsi, les informations en cours de mémorisation doivent être réactivées de temps en temps pour pallier la dégradation temporelle. Cette

réactivation ne peut se faire qu'entre l'épisode de traitement et l'épisode de mémorisation suivant. Ce laps de temps de rafraîchissement peut être attribué à des mécanismes de réactivation des éléments récemment mémorisés, comme la boucle phonologique (Baddeley & Hitch, 1974) ou la redirection du centre d'attention (Cowan, 2001). Ces deux mécanismes de réactivation sont indépendants l'un de l'autre (voir Camos & Barrouillet, 2014b pour une discussion). Contrairement à la boucle phonologique, le mécanisme de réactivation par redirection du centre d'attention peut s'appliquer à des items multimodaux (verbal et visuospatial ; Vergauwe, Barrouillet, & Camos, 2010).

En conclusion, le modèle de partage temporel des ressources s'appuie sur l'idée de l'activation temporaire des informations en mémoire durant une tâche concurrente (Barrouillet & Camos, 2014). Ce modèle postule que le rafraîchissement peut être à la fois non attentionnel avec la boucle phonologique (Baddeley & Hitch, 1974) ou attentionnel avec la redirection du centre d'attention (Cowan, 2001). Barrouillet et collaborateurs (2004) ont apporté une nouvelle définition de la charge cognitive, en la liant à la dégradation temporelle des informations mémorisées.

Ces 3 modèles théoriques, c'est-à-dire le modèle des composants multiples, celui des processus intégrés et celui de partage temporel des ressources, permettent d'appréhender la performance en mémoire de travail de différents points de vue. Malgré leurs divergences, les auteurs de ces modèles théoriques s'accordent sur l'exigence d'allier le traitement et la mémorisation lors de l'évaluation des performances en mémoire de travail. Les auteurs n'identifient pas les mêmes

déterminants développementaux, tels que la rapidité de la détérioration des informations mémorisées (Barrouillet et al., 2004), l'espace de stockage temporaire disponible (Case, 1972) ou encore le contrôle exécutif (Engle et al., 1999). Malgré les divergences concernant ces facteurs développementaux, tous les auteurs s'accordent sur une progression continue des performances en mémoire de travail de l'enfance jusqu'à l'âge adulte (Camos & Barrouillet, 2014b ; Cowan & Alloway, 2009).



### **ARTICLE 3 - MESURER LE DÉVELOPPEMENT DE LA MÉMOIRE DE TRAVAIL : EXEMPLE D'UNE TÂCHE D'EMPAN COMPLEXE ADAPTATIVE**

Parmi les différents outils d'évaluation de la capacité de la mémoire de travail (voir Wilhelm, Hildebrandt, & Oberauer, 2013 pour une revue), les tâches d'empan complexe sont les épreuves les plus utilisées dans la littérature (Conway et al., 2005 ; Redick et al., 2012). Ce type d'évaluation exige de réaliser séquentiellement une phase de traitement (par ex. juger la véracité d'une phrase) et une phase de mémorisation (par ex. mémoriser un chiffre). Les tâches d'empan complexe répondent ainsi parfaitement à la définition communément admise de la mémoire de travail, c'est-à-dire la capacité à traiter, manipuler et stocker des informations au cours d'activités cognitives. Son évaluation est importante au regard de son rôle crucial dans le fonctionnement de l'intelligence (Ackerman et al., 2005 ; Chuderski, 2013 ; Cornoldi & Giofrè, 2014 ; Giofrè et al., 2013 ; Kane et al., 2005) et dans les capacités d'apprentissage (Daneman & Carpenter, 2008 ; Friso-van den Bos et al., 2013). Au travers de cette présente étude, nous allons apporter une réflexion sur la manière d'évaluer la capacité de la mémoire de travail et d'étudier son développement chez des participants âgés de 8 à 23 ans.

Les empan complexes ont été très largement utilisés dans les études développementales (Tillman, 2011). Cependant, l'utilisation d'une même tâche de mémoire de travail auprès d'individus ayant des différences d'âge importantes et/ou des niveaux d'aptitudes cognitives extrêmes est assujettie à une contrainte essentielle : l'adaptation de la difficulté de la tâche selon le niveau de performance du participant. En effet, cette contrainte est fondamentale afin de préserver l'engagement du participant dans la tâche, et d'estimer au mieux ses performances en mémoire de

travail (Gonthier et al., 2017). Par ailleurs, les tâches d'empan complexe utilisées évaluent souvent les performances en mémoire de travail uniquement dans une modalité verbale (Alloway & Alloway, 2013 ; Tillman, 2011). Alors que cette capacité cognitive est indépendante du mode de présentation (Kane, Hambrick, Tuholski, Wilhelm, Payne, & Engle, 2004), l'évaluation unimodale des performances en mémoire de travail peut induire un biais dans les estimations, lié à la spécificité de la modalité unique impliquée (Gonthier et al., 2017 ; Gonthier, Thomassin, & Roulin, 2015 ; Oswald, McAbee, Redick, & Hambrick, 2014). L'utilisation d'une épreuve brève d'empan complexe unique et multimodale s'adaptant aux performances de l'individu semble répondre à ces deux exigences.

Nous avons alors créé une épreuve informatisée, multimodale (verbale et non verbale), s'adaptant aux capacités de l'individu : l'*Adaptive Composite Complex Span* (ACCES ; Gonthier et al., 2017). L'originalité de cette tâche est d'adapter la difficulté en fonction des performances réalisées par le participant au cours des épreuves. Elle offre également une estimation rapide du domaine général de la mémoire de travail à partir d'un score composite issu de 3 épreuves d'empan complexe multimodales. Son élaboration a été motivée par la réflexion d'utiliser une seule tâche suffisamment difficile au cours des âges, et de permettre d'éviter l'effet plafond dans l'évaluation des enfants ayant des performances extrêmes comme les enfants à haut potentiel intellectuel (Vock & Holling, 2008).

Après avoir discuté de la manière d'évaluer la mémoire de travail, la présente étude analysera le développement de la capacité de la mémoire de travail à partir d'un échantillon de 724 participants âgés de 8 à 23 ans. Au-delà de l'intérêt d'explorer la

tendance développementale de la capacité de la mémoire de travail, l'objectif est de montrer la pertinence d'une tâche multimodale avec une procédure adaptative dans l'évaluation de cette capacité cognitive essentielle au cours d'une grande étendue d'âge.

# Mesurer le développement de la mémoire de travail :

## Exemple d'une tâche d'empan complexe adaptative

Alexandre Aubry <sup>1</sup>, Corentin Gonthier <sup>2</sup>, Mathieu Hainselin <sup>1</sup> et Béatrice Bourdin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Picardie Jules Verne, EA7273 CRP-CPO, Amiens, France

<sup>2</sup> Université Rennes 2, LP3C EA 1285, Rennes, France

Soumis pour publication dans la revue *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*

Preprint disponible sur *PsyArXiv*, doi:10.31234/osf.io/uxbt7

Running title: Développement de la mémoire de travail

**Mots-clés :** mémoire de travail ; test adaptatif ; empan complexe, trajectoire

## 1. Introduction

La mémoire de travail (MDT) peut être définie comme la capacité à stocker, manipuler et traiter des informations au cours d'activités cognitives. Le nombre d'informations pouvant être maintenues en MDT au cours d'une activité cognitive est limité (Wilhelm, Oberauer, Hildebrandt, & Conway, 2013). Cette capacité joue un rôle essentiel dans le fonctionnement intellectuel (Ackerman et al., 2005 ; Chuderski, 2013 ; Cornoldi & Giofrè, 2014 ; Giofrè et al., 2013 ; Kane et al., 2005) et dans la réussite scolaire et les capacités d'apprentissage (e.g. Alloway & Alloway, 2010 ; Gathercole, Brown, & Pickering, 2003). La capacité en MDT contribue également au développement de nombreux processus cognitifs comme le langage (Linck, Osthus, Koeth, & Bunting, 2013), ou la résolution de problèmes mathématiques (Swanson, 2011).

La plupart des chercheurs s'accordent pour reconnaître que la MDT naît de l'interaction de plusieurs processus cognitifs. La manière dont est décrit et théorisé le concept de MDT varie en fonction des modèles (Baddeley, 2012 ; Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Cowan, 2001 ; Engle et al., 1999 ; Logie, 2011). Cependant, quelle que soit la manière dont nous conceptualisons la MDT, il y a un large consensus relatif aux processus cognitifs impliqués dans la capacité de la MDT. Plus précisément, la MDT comprend deux processus cognitifs principaux : un processus mnésique, correspondant au rappel de l'information brièvement stockée, et un processus cognitif lié au traitement, à la manipulation et l'intégration de l'information. La combinaison de ces deux processus cognitifs permet ainsi de distinguer le concept de MDT de celui de mémoire à court terme (MCT), envisagé comme un simple système de stockage.

Globalement, la capacité de la MDT augmente de l'enfance à l'adolescence (Gathercole, 1999 ; Siegel & Ryan, 1989) jusqu'à l'âge adulte et décline au cours du vieillissement (Alloway & Alloway, 2013 ; Swanson, 1999). Cependant, l'augmentation linéaire des performances avec l'âge est sujet à discussion (Roberts, Strait, & Decker, 2018). Certaines recherches ont observé un palier se situant au début de l'adolescence (Gathercole, 1999 ; Thaler et al., 2015), tandis que d'autres ne mettent en évidence aucun plateau, mais une augmentation continue de la capacité de la MDT (Goldstein et al., 2014). Ces paliers de progression peuvent cependant constituer un artefact lié au type de tâche ou à la méthode de notation utilisés pour l'évaluation de la capacité de la MDT. En effet, le choix des épreuves d'évaluation de la MDT s'avère être un réel défi dans les études développementales. Des contraintes liées à la sensibilité des épreuves à tous les âges peuvent poser de nombreux problèmes impliquant la sous-estimation de la capacité de la MDT. En effet, une épreuve qui présente une sensibilité adéquate pour de jeunes enfants peut être trop simple pour des enfants plus âgés, ce qui rend difficile l'utilisation de la même épreuve à des âges différents. De plus, la majorité des recherches développementales utilise uniquement des tests de MDT dans la modalité verbale (Alloway & Alloway, 2013). Par conséquent, la capacité de la MDT est fortement affectée par des processus spécifiques liés à la tâche, comme les capacités linguistiques. La MDT peut être vue comme une aptitude cognitive générale issue de la corrélation forte entre les différentes tâches de MDT verbales et non verbales (Oswald, McAbee, Redick, & Hambrick, 2014). Cette aptitude générale de MDT correspond à la capacité de traiter, de stocker et de rappeler des informations en cours, quelle que soit la modalité de cette information. Enfin, le type de notation des épreuves de MDT varie selon les études et a un impact sur la

fidélité et la validité de l'estimation de la capacité de la MDT (Conway et al., 2005 ; St Clair-Thompson & Sykes, 2010). La question de la meilleure manière d'évaluer de la capacité de la MDT semble donc essentielle afin d'étudier son développement.

## **2. Évaluation de la capacité de la mémoire de travail**

En général, la capacité de la MDT est évaluée à travers des tâches d'empan simples, comme l'empan de chiffres endroit/envers ; c'est notamment le cas dans les batteries d'évaluation des aptitudes cognitives comme le Wechsler Intelligence Scale for Children — 5e Édition (WISC-V ; Wechsler, 2016), le Kaufman Assessment Battery for Children — 2de Édition (KABC-II ; Kaufman & Kaufman, 2008) ou encore la NEPSY-2 (Korkman, Kirk, & Kemp, 2012). La littérature s'accorde pourtant à dire que ces épreuves ne sont pas adaptées et ne mesurent pas réellement la capacité de la MDT (Conway et al., 2005; Delaloye, Ludwig, Borella, Chicherio, & de Ribaupierre, 2008). En effet, lorsqu'il s'agit de rappeler une liste de chiffres à l'envers, la manipulation mentale demandée ne constitue pas un traitement cognitif suffisamment coûteux pour faire intervenir la MDT (Hutton & Towse, 2001 ; St Clair-Thompson & Allen, 2013 ; St Clair-Thompson & Sykes, 2010). De plus, certaines de ces batteries associent, dans un seul indice composite, des épreuves évaluant la MCT et la MDT. Il y a donc une confusion entre ces deux types de mémoire. Par exemple, le score standard de l'épreuve *Mémoire des Chiffres* (WISC-V ; Wechsler, 2016) est constitué à partir des performances de l'individu à trois épreuves différentes de mémorisation de chiffres : la mémorisation de chiffres en ordre direct (évaluant la MCT), la mémorisation de chiffres en ordre indirect (supposée évaluer la MDT, mais

constituant plutôt une mesure de MCT), et l'épreuve de séquence lettres-chiffres (supposée mesurer la MDT).

Dans le domaine de la recherche en psychologie cognitive, les performances en MDT sont généralement évaluées par des épreuves d'empan complexe (Conway et al., 2005). Ce type d'épreuve est constitué d'une alternance entre des phases de traitement, comme le jugement de la véracité d'une phrase, et des phases de mémorisation d'un stimulus, tel qu'un chiffre. À la fin de chaque série, l'individu doit rappeler les différents stimuli mémorisés dans l'ordre de présentation. Ce type de tâche impose un traitement cognitif suffisamment coûteux pour que les deux fonctions principales (stockage et traitement) de la MDT soient mobilisées. La structure d'une tâche d'empan complexe répond donc parfaitement à la définition classique de la MDT.

Par ailleurs, le temps de traitement de la phase interférente semble jouer un rôle important sur la capacité de rappel durant une tâche de MDT (Barrouillet & Camos, 2012 ; Bayliss, Jarrold, Baddeley, Gunn, & Leigh, 2005 ; Towse & Hitch, 1995 ; Saito & Miyake, 2004). En effet, chaque item mémorisé est susceptible d'être oublié à cause du temps passé sur la tâche interférente (Barrouillet, Bernadin, & Camos, 2004 ; Camos & Barrouillet, 2014 ; Cowan, 1999 ; Towse & Hitch, 1995). Le temps de traitement de la tâche interférente est tributaire du coût du traitement de cette tâche (Barrouillet et al., 2004). Autrement dit, plus le coût de traitement de la phase interférente est faible, plus elle sera traitée rapidement par l'individu facilitant ainsi la mémorisation des items. Par conséquent, l'estimation de la capacité de la MDT est influencée par le temps entre les items à mémoriser. Il est donc important de contrôler le temps entre les phases de mémorisation et de s'assurer de la réalisation de cette



tâche concurrente. Le contrôle de cette phase interférente a également une influence forte sur le lien entre la capacité de la MDT et les aptitudes cognitives comme le raisonnement fluide (Friedman & Myiake, 2004 ; Lépine, Barrouillet, & Camos, 2005 ; St Clair-Thompson, 2007). Ainsi, les tâches d'empan complexe fonctionnent mieux lorsque le temps des phases interférentes est contraint (Engle, Cantor, & Carullo, 1992 ; McCabe, 2010). Les tâches informatisées permettent d'automatiser facilement l'alternance entre la phase interférente et la phase de mémorisation et de contrôler facilement le temps et la précision du traitement de la phase interférente, ce qui en fait de meilleures mesures de la capacité de la MDT (Conway et al., 2005 ; Gonthier, Thomasin, & Roulin, 2015 ; Unsworth, Heitz, Schrock, & Engle, 2005).

Il existe peu d'épreuves d'empan complexe disponibles en langue française. Des épreuves d'empan de lecture ont été développées en français (par ex. Delaloye et al., 2008 ; Desmette, Hupet, Schelstraete, & van der Linden, 1995 ; Fournet et al., 2012 ; Seigneuric, De Guibert, Megherbi, Potier, & Picard, 2009), mais elles permettent une évaluation de la capacité de la MDT uniquement dans la modalité verbale. L'utilisation d'une épreuve avec une seule modalité a pour conséquence d'influencer l'estimation de la capacité de la MDT par la variance spécifique de la tâche. Afin d'estimer le domaine général de la MDT, il est donc plus approprié d'utiliser des épreuves d'empan complexe composites, c'est-à-dire associant plusieurs modalités (par ex. la mémorisation de matériel verbal et spatial ; Foster et al., 2014). La première épreuve composite d'empans complexes à avoir été développée en langue française, intitulée *Empan Complexe Composite* (CCS ; Gonthier et al., 2015), était toutefois destinée à l'évaluation chez l'adulte. L'objectif du présent article est de présenter une adaptation de cette épreuve de mémoire de travail composite pour les enfants et adolescents

intitulés *Adaptive Composite Complex Span* (ACCES, Gonthier, Aubry, & Bourdin, 2017).

L'ACCES présente un avantage pour les études développementales grâce à sa procédure adaptative de la difficulté des essais, c'est-à-dire que le nombre d'items à retenir à l'essai suivant est déterminé par le nombre d'items correctement rappelés à l'essai précédent. Contrairement à une procédure qui présente les items dans l'ordre de difficulté ascendante, une procédure adaptative permet d'éviter qu'une même épreuve utilisée pour des enfants de 8 ans soit trop facile pour des adolescents de 16 ans et entraîne un effet plafond, ou à l'inverse, qu'une épreuve conçue pour des adolescents entraîne un effet plancher chez des enfants plus jeunes. Par ailleurs, les épreuves non-adaptatives ne permettent pas toujours d'évaluer correctement tous les individus, même au sein d'un même groupe d'âge (Vock & Holling, 2008). À titre d'exemple, les enfants à haut potentiel intellectuel présentent généralement des performances en MDT plus élevées que celles des enfants typiques de même âge chronologique (Calero, García-Martín, Jiménez, Kazén, & Araque, 2007). Ainsi, l'utilisation d'une procédure adaptative, intéressante pour l'ensemble de la population, quel que soit l'âge, semble particulièrement adaptée dans les études développementales, y compris avec des groupes d'individus ayant des capacités cognitives extrêmes (McCoach, Rambo, & Welsh, 2012).

Par contraste, la plupart des épreuves de MDT utilisent une procédure ascendante pour la difficulté des essais, combinée à un critère d'arrêt. Autrement dit, l'individu devra réaliser des essais faciles, puis de plus en plus difficiles avant de parvenir aux essais plus adaptés à ses réelles performances. L'arrêt de l'épreuve est programmé

après un certain nombre d'échecs consécutifs fixé à l'avance (e.g. Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard, & Camos, 2009). Ce type de procédure pose toutefois plusieurs problèmes, notamment en ce qui concerne la durée de passation pour les enfants plus âgés ou ayant une grande capacité de MDT, comme les enfants à haut potentiel intellectuel (Aubry & Bourdin, 2017). Cela soulève notamment la question de la fatigue et de l'accumulation de l'interférence proactive en cours de tâche (Kane & Engle, 2000). La présence d'une interférence proactive peut diminuer la puissance prédictive de la tâche de MDT (Lustig, May, & Hasher, 2001), et la résistance à cette interférence proactive est dépendante de l'âge du participant (Loosli, Rahm, Unterrainer, Weiller, & Kaller, 2014). Avec une procédure ascendante de la difficulté, la performance en MDT n'est pas estimée à partir du même nombre d'essais selon le niveau d'aptitude en MDT des participants. En effet, un participant ayant une capacité de MDT élevée peut échouer à un essai facile par inattention ou par ennui. Il peut donc avoir une sous-estimation critique de sa performance en MDT. L'utilisation d'une procédure adaptative permet de résoudre ces problèmes, dans la mesure où chaque individu réalise le même nombre d'essais et où la tâche n'est jamais trop éloignée de son niveau d'aptitude réel.

La méthode de cotation a également une importance cruciale dans l'appréhension de la variabilité interindividuelle des performances aux épreuves de MDT (Conway et al., 2005 ; St Clair-Thompson & Sykes, 2010), et influence les caractéristiques psychométriques et prédictives des épreuves de MDT. Dans la littérature, nous retrouvons principalement deux types de cotation :

1) La cotation absolue correspond à la somme de tous les essais où tous les items ont été entièrement rappelés dans l'ordre d'apparition. Par exemple, l'expérimentateur présente une série de chiffres telle que 6-4-3-9. Dans ce type de cotation, l'enfant obtiendra soit 0 point si la réponse donnée comprend une ou plusieurs erreurs (par ex. : 6-3-4-9) soit 1 point si la réponse donnée est totalement correcte (par ex. : 6-4-3-9). La cotation absolue est souvent imposée par les batteries d'évaluation classiquement utilisées par les psychologues cliniciens, mais elle génère une perte d'informations importante. Par exemple, un enfant rappelant la séquence 6-4-3 a le même score qu'un enfant qui ne rappelle aucun chiffre, mais ils n'ont pas une performance équivalente en MDT. De ce fait, cette méthode a tendance à diminuer la fiabilité de la mesure de la capacité de la MDT (Conway et al., 2005 ; Redick et al., 2012) ainsi que l'utilité de cette mesure pour prédire les performances scolaires et les aptitudes cognitives telles que le raisonnement fluide (St Clair-Thompson, & Sykes, 2010).

2) La cotation partielle correspond à la somme des items correctement rappelés. Par exemple, pour la série 6-4-3-9, le participant obtiendra 2 points s'il répond 6-3-4-9 et 4 points s'il restitue la série complète (par ex. : 6-4-3-9). Ce type de cotation permet de mieux prendre en compte la variabilité interindividuelle que la cotation absolue. Elle permet également d'améliorer la fidélité de la mesure ainsi que la prédiction des performances scolaires et des aptitudes cognitives de haut niveau (Conway et al., 2005 ; Redick et al., 2012 ; St Clair-Thompson & Sykes, 2010). Ce mode de cotation a donc été retenu pour l'ACCES.

En synthèse, l'ACCES (Gonthier et al., 2017) a été développé de façon à tenir compte de plusieurs contraintes pour optimiser l'estimation de la capacité de la MDT dans une perspective développementale : une tâche informatisée, une évaluation à l'aide d'empans complexes, une combinaison de différentes tâches évaluant plusieurs modalités, une procédure adaptative et une cotation partielle des performances en rappel. L'un des intérêts de ce format est de pouvoir utiliser une même épreuve d'empans complexes abrégés au travers des différents groupes d'âge. La section suivante présente le détail de la composition de l'ACCES et un exemple, afin d'illustrer la trajectoire développementale de la capacité générale de la MDT. Nous nous intéresserons également au rôle de l'accroissement du temps de traitement des phases interférentes avec l'âge sur la capacité de la MDT. Nous discuterons ensuite de l'intérêt d'adapter une telle tâche informatisée pour les psychologues cliniciens en général et pour les psychologues scolaires en particulier.

### **3. Méthode**

#### **3.1. Participants**

753 participants âgés de 7 ans et 9 mois à 23 ans et 10 mois ont participé à l'étude. Tous les enfants et adolescents étaient scolarisés en milieu ordinaire, du CE2 à la seconde. Ils ont été recrutés dans 12 établissements scolaires publics et privés de l'Académie d'Amiens avec une démographie socio-économique variée. Les participants n'avaient aucun trouble neurologique ou spécifique des apprentissages avéré. Une partie de l'échantillon a été utilisée pour l'étude de la validation de la tâche ACCES (Gonthier et al., 2017). Parmi notre échantillon, 177 étudiants de Licence ont été recrutés dans un département de Psychologie d'une université française.

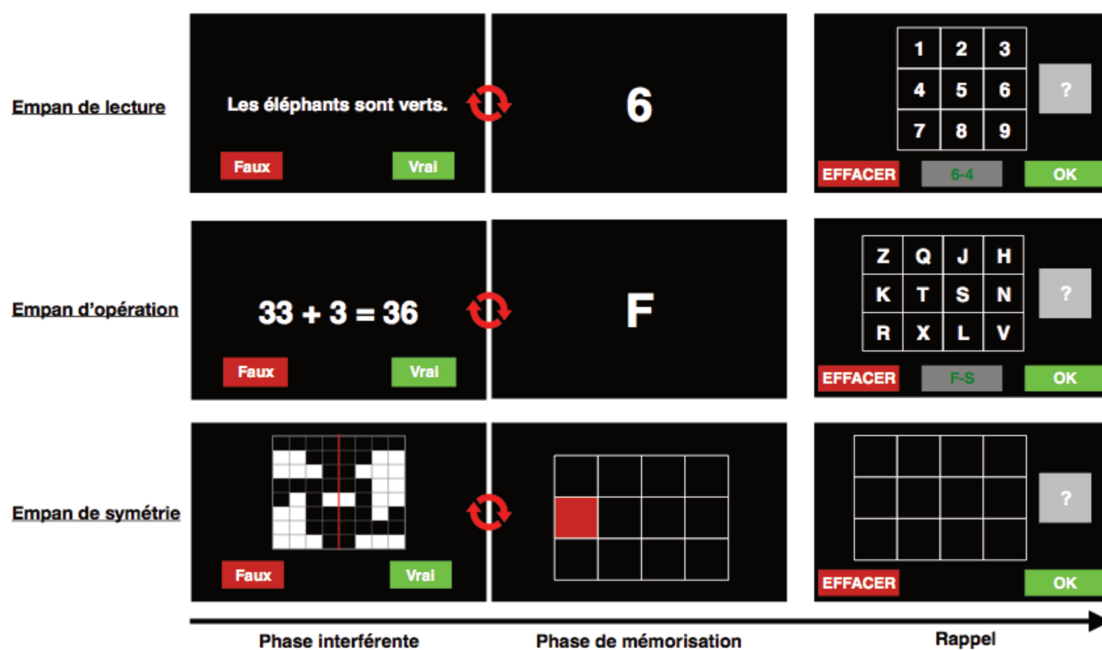
### 3.2. Matériel

**Mémoire de travail :** Une épreuve de trois tâches d'empan complexe courtes et informatisées intitulée *Adaptive Composite Complex Span* (ACCES ; Gonthier et al., 2017) a été utilisée afin de mesurer le domaine général de la capacité de la MDT. L'épreuve a été programmée sous PsychoPy (Peirce, 2007). Elle présente une fiabilité test-retest acceptable ( $r = 0,70$ ), et une corrélation avec les Matrices Progressives de Raven ( $r = 0,34$ ) indiquant une validité concourante satisfaisante (Gonthier et al., 2017). L'épreuve est composée de 3 tâches classiques d'empan complexe abrégées : l'empan de lecture (*Reading span*), l'empan de symétrie (*Symmetry span*) et l'empan d'opération (*Operation span*). Toutes ces tâches ont la même structure (voir Figure 1) : les participants doivent résoudre des problèmes simples et mémoriser des stimuli présentés après chaque problème. À la fin de chaque essai, les participants sont invités à rappeler tous les stimuli mémorisés dans l'ordre d'apparition. L'ACCES utilise une procédure adaptative de la difficulté des essais selon les performances du participant à l'essai précédent. Le premier essai de chaque tâche d'empan complexe est identique et d'une difficulté modérée (c.-à-d. 4 éléments à mémoriser à l'empan de lecture et d'opération et 3 éléments à mémoriser à l'empan de symétrie). Ensuite, la difficulté de l'essai suivant est dépendante de la proportion d'items correctement rappelés sur l'essai précédent. La taille de l'essai suivant augmente d'un élément si et seulement si le participant rappelle 100 % des items mémorisés, et diminue d'un élément quand le participant rappelle moins de 60 % des items à mémoriser. Dans le cas contraire, la taille de l'essai suivant reste la même que l'essai précédent. Chaque empan complexe comprend 6 essais. Au total, l'épreuve comprend donc 18 essais. La durée de passation est généralement de 29 minutes ( $\pm 7$  minutes).

Les participants réalisent chaque tâche d'empan complexe dans l'ordre suivant :

- 1) l'empan de lecture qui demande aux participants d'alterner entre le jugement de la véracité d'une phrase (par ex. « Les éléphants sont verts ») et la mémorisation d'un chiffre ;
- 2) l'empan de symétrie qui nécessite de juger la symétrie d'une figure géométrique et de mémoriser la localisation spatiale d'un carré rouge dans une grille de 4x4 cases ;
- 3) l'empan d'opération qui implique à la fois un jugement d'exactitude d'une opération mathématique simple (c.-à-d. une addition ou une soustraction) et la mémorisation d'une lettre. Toutes les lettres sont des consonnes afin qu'il soit impossible de créer des syllabes. De plus, les lettres sont phonétiquement distinctes. Pour chaque tâche, le même stimulus n'apparaît jamais deux fois dans la même séquence à mémoriser.

La cotation est basée sur le nombre total de stimuli correctement rappelés de chaque tâche (Conway et al., 2005). Ce nombre total de stimuli correctement rappelés est ensuite standardisé (transformé en score z), puis la moyenne a été réalisée sur les trois tâches, de façon à réaliser un score composite de la capacité de la MDT. La proportion de réponses correctes lors de la phase interférente est également enregistrée afin de s'assurer que le traitement a été correctement réalisé durant la phase interférente. Le score de rappel d'une épreuve est exclu si et seulement si l'individu a une proportion de réponses correctes inférieure au 5<sup>e</sup> centile de la distribution ; dans ce cas, le score composite est calculé à partir des deux autres épreuves (Gonthier et al., 2015). Si 2 scores de rappel sont exclus de cette façon, alors la performance du participant à l'ACCES est considérée comme non évaluable. Par ailleurs, le temps de réponse médian du traitement aux phases interférentes de chaque épreuve est également enregistré.



**Figure 1.** Illustration des 3 épreuves d'empan complexe courtes et informatisées

### 3.3. Procédure

Tous les participants, et leurs représentants légaux, ont été informés par écrit des objectifs de cette recherche et ont signé un consentement pour la participation volontaire à notre étude. Lors des sessions, nous demandions oralement une nouvelle fois si chaque participant était d'accord pour réaliser notre recherche. Les passations ont été effectuées collectivement soit dans une salle informatique dans les collèges et les écoles élémentaires avec l'autorisation des chefs d'établissement, soit dans une salle calme dédiée à la réalisation de l'épreuve avec des ordinateurs portables.

### 3.4. Analyses statistiques

Tous les traitements statistiques ont été réalisés à l'aide de R 3.5.0 (R Core Team, 2018). Les données, ainsi que le script R des analyses statistiques, sont disponibles sur la plateforme Open Science Framework (OSF) : <http://osf.io/59aky>.



Pour l'analyse descriptive, nous avons estimé l'indice de symétrie (*skewness*) et l'indice d'aplatissement (*kurtosis*), afin d'évaluer l'importance de la violation de la normalité des données (voir Tableau 1).

Afin d'étudier le rôle de l'accroissement du temps de traitement avec l'âge sur la capacité de rappel, une analyse de similarités a été réalisée à partir de la librairie *yhat* (Nimon, Oswald, & Roberts, 2013) pour déterminer la part spécifique et commune de la variance du score de rappel par deux prédicteurs, l'âge chronologique et la moyenne des temps de traitement centrés-réduits des phases interférentes (Nimon, Lewis, Kane, & Haynes, 2008).

#### **4. Résultats**

Parmi notre échantillon de 753 participants, 8 participants ont été exclus de l'analyse statistique (soit 1,06 %), car ils n'avaient pas réalisé la totalité de l'évaluation de la MDT. Ensuite, 21 participants (soit 2,79 %) ont été exclus de l'analyse statistique, car la proportion de bonnes réponses aux tâches interférentes (2 sur 3) était inférieure au critère d'exclusion, c'est-à-dire au 5e centile, dans deux tâches sur trois. Le Tableau 1 présente les données sociodémographiques, le score composite de rappel et du temps de traitement de notre échantillon. Le score composite de rappel se distribue normalement (asymétrie  $< 1$ ; aplatissement  $< 1$ ) à chaque groupe d'âge (c.-à-d. l'enfance, l'adolescence et l'âge adulte), confirmant l'absence d'effet plancher ou plafond.

**Tableau 1 : Description sociodémographique de l'échantillon**

|                                      | n   | Age<br>(Années) | Fille<br>(%) | Rappel          |           |                   | Temps           |           |                   |
|--------------------------------------|-----|-----------------|--------------|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|-----------|-------------------|
|                                      |     |                 |              | M<br>(É.T)      | Asymétrie | Aplatisse<br>ment | M<br>(É.T)      | Asymétrie | Aplatisse<br>ment |
| <b>Enfants<br/>(8 - 11 ans)</b>      | 316 | 10,29<br>(1,14) | 49,05        | -0,49<br>(0,73) | -0,28     | 0,48              | 0,60<br>(0,81)  | 0,60      | 0,20              |
| <b>Adolescents<br/>(12 - 16 ans)</b> | 231 | 13,33<br>(1,11) | 51,95        | 0,00<br>(0,75)  | 0,01      | 0,00              | -0,13<br>(0,67) | 1,03      | 1,50              |
| <b>Adultes<br/>(18 - 23 ans)</b>     | 177 | 21,16<br>(1,02) | 81,36        | 0,80<br>(0,49)  | -0,03     | -0,12             | -0,82<br>(0,41) | 0,61      | 0,84              |

*Notes.* N = 724 ; Rappel : Moyenne des scores de rappel centrés-réduites des 3 épreuves ; Temps : Moyenne des temps médian des phases interférentes centrés-réduites des 3 épreuves.

Afin d'étudier la trajectoire développementale de la capacité de la MDT des âges de 8 à 23 ans, nous avons réalisé plusieurs régressions polynomiales avec les termes linéaire, quadratique et cubique de l'âge chronologique. Tous les prérequis d'application des différentes régressions polynomiales ont été vérifiés graphiquement. La distance de Cook n'a révélé aucune valeur extrême pouvant influencer les différentes analyses.

Plusieurs modèles de régressions polynomiales ont été réalisés afin de déterminer le type de trajectoires de développement de la capacité de la MDT durant les âges de 8 à 23 ans. Quatre modèles ont été comparés : 1) le modèle constant correspond au modèle de régression où le score de rappel est prédit par une constante. Il est considéré comme le modèle de référence qui sera comparé avec les autres modèles de régression ; 2) le modèle linéaire formalise le développement du score de rappel correspondant à une augmentation constante de la capacité de la MDT durant les âges de 8 à 23 ans ; 3) le modèle quadratique décrit le développement de la capacité de la MDT comme

l'augmentation du score de rappel suivie d'un ralentissement lors de l'accroissement de l'âge chronologique ; 4) le modèle cubique correspond à une augmentation du score de rappel suivie d'un ralentissement pendant une période avant d'augmenter de nouveau au cours du développement.

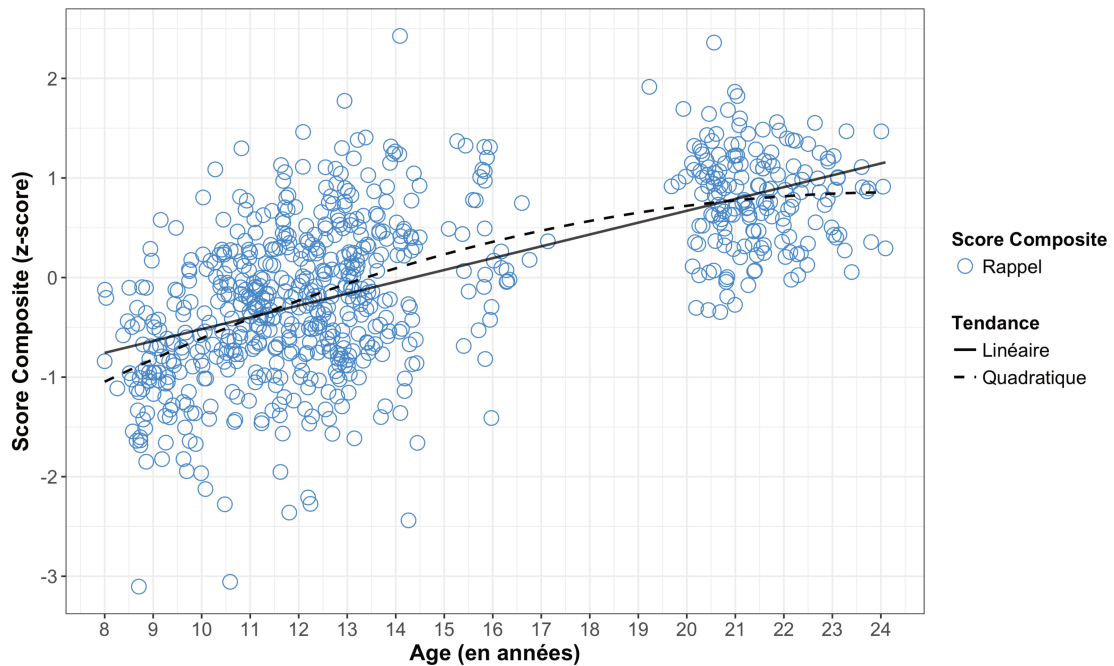
Pour évaluer l'adéquation de chaque modèle de régression, plusieurs indicateurs ont été utilisés (Cohen, Cohen, West & Aiken, 2013) : l'analyse de la déviance résiduelle, le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information Bayésien (BIC). L'analyse de la déviance résiduelle permet de déterminer si la réduction des résidus entre le modèle de référence et les autres modèles de régression est significative. Les indices AIC et BIC permettent d'obtenir une information d'adéquation entre le modèle testé et les données réelles. Plus la valeur des indices AIC et BIC est petite, plus le modèle explique mieux et de manière parcimonieuse les données réelles parmi tous les modèles testés. Le Tableau 2 présente les résultats de la comparaison des modèles de régressions polynomiales. Le modèle de régression polynomiale quadratique est le meilleur modèle qui décrit la courbe développementale de la capacité de la MDT de notre échantillon,  $F(2, 721) = 241,30$ ,  $MSE = 0,63$ ,  $p < 0,01$ ,  $R^2 = 0,401$ .

**Tableau 2 : Comparaison de modèles de régression polynomiale**

|                    | ddl<br>résiduel | Déviance<br>résiduelle | ddl<br>différenc<br>e | <i>F</i> | AIC     | BIC     |
|--------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|----------|---------|---------|
| <b>Constant</b>    | 723             | 529,04                 |                       |          | 1831.48 | 1840.65 |
| <b>Linéaire</b>    | 722             | 325,40                 | 1                     | 462,75** | 1481.61 | 1495.37 |
| <b>Quadratique</b> | 721             | 316,89                 | 1                     | 19,34**  | 1464.43 | 1482.76 |
| <b>Cubique</b>     | 720             | 316,84                 | 1                     | 0,11     | 1466.31 | 1489.24 |

*Note.* ddl : degré de liberté ; AIC : Critère d'Information d'Akaike ; BIC : Critère d'Information Bayésien ; \*\*  $p < 0,01$

Les résultats du modèle quadratique indique des effets linéaire et curviligne de l'âge chronologique sur le score de rappel ( $\beta = 0,75$ ,  $p < 0,001$  et  $\beta = -0,18$ ,  $p < 0,001$ , pour le terme linéaire et quadratique respectivement). En effet, la Figure 1 montre une importante augmentation de la capacité de la MDT avec l'âge qui ralentie vers la fin de l'adolescence et le début de l'âge adulte.



**Figure 1.** Distribution du score composite en fonction des groupes d'âge.

Le temps de traitement durant la phase d'interférence est fortement lié à l'âge chronologique et au score de rappel (voir Tableau 3). En effet, le temps de traitement et l'âge chronologique expliquent 51,92 % de l'augmentation du score de rappel,  $F(2, 721) = 389,40$ ,  $MSE = 0,59$ ,  $p < 0,001$ . L'analyse de similarités montre que la variance unique de l'âge chronologique explique 5,21 % de l'augmentation du score de rappel, alors que celle du temps de traitement explique 13,43 % de cette augmentation de performance à la tâche de MDT. La variance partagée entre l'âge chronologique et le temps de traitement explique 33,29 % de la variance du score de rappel. Cela suggère

que l'augmentation de la capacité de la MDT avec l'âge peut être partiellement expliquée par l'effet de l'âge sur le temps de traitement des phases interférentes.

**Tableau 3 : Matrice de corrélations**

|                  | 1 | 2      | 3       |
|------------------|---|--------|---------|
| <b>1. Age</b>    | - | 0,62** | -0,66** |
| <b>2. Rappel</b> |   | -      | -0,68** |
| <b>3. Temps</b>  |   |        | -       |

*Note.* N = 724 ; Rappel : Moyenne des scores de rappel centrés-réduites des 3 épreuves ; Temps : Moyenne des temps médian des phases interférentes centrés-réduites des 3 épreuves. Les valeurs de  $p$  ont été corrigées par la méthode de Holm (1978). \*\*  $p < 0,01$

## 5. Discussion

L'objectif de ce travail était d'illustrer, à l'aide de l'exemple de la tâche ACCES (Gonthier et al., 2017), la construction d'une mesure de la capacité de la MDT pour étudier sa trajectoire de développement. D'après la littérature, les principales contraintes à prendre en compte pour mesurer correctement la MDT sont : 1) de combiner une phase de traitement et une phase de mémorisation d'items (Conway et al., 2005) ; 2) d'informatiser son évaluation afin de mieux contrôler l'alternance de ces phases (Gonthier et al., 2015 ; Unsworth et al., 2005) ; 3) de combiner plusieurs tâches de MDT évaluant différentes modalités afin d'obtenir une estimation de l'aptitude générale de la MDT (Oswald et al., 2014) ; 4) d'utiliser une procédure adaptative (Gonthier et al., 2017) ; 5) d'avoir recours à une cotation partielle des résultats afin d'avoir une meilleure fiabilité de la mesure, et une meilleure qualité prédictive des

performances scolaires et d'autres aptitudes cognitives comme le raisonnement fluide (Conway et al., 2005 ; Redick et al., 2012 ; St Clair-Thompson & Sykes, 2010).

Tout d'abord, nos résultats montrent que la distribution du score composite du rappel suit approximativement une loi normale chez les enfants (8 - 11 ans), les adolescents (12 - 16 ans) et les jeunes adultes (18 - 23 ans). Cela indique qu'il n'y a pas d'effet plancher chez les individus plus jeunes ni d'effet plafond chez les individus plus âgés. La procédure adaptative de la difficulté dans une tâche de MDT constitue donc une technique simple permettant d'éviter l'effet plancher ou/et plafond dans les études développementales, même chez des individus de niveaux d'aptitude très différents. Nos résultats montrent également que la capacité de la MDT se développe de l'enfance à l'adolescence (Brocki, & Bohlin, 2004 ; Gathercole, 1998, 1999 ; Gathercole et al., 2004, Goldstein et al., 2014 ; Thaler et al., 2013). Contrairement aux précédentes études, nos résultats indiquent que cette augmentation continue jusqu'au début de l'âge adulte où la capacité de la MDT tend à ne plus augmenter. Roberts et al. (2018) ont également trouvé des résultats similaires. Cependant, l'étendue de l'âge de notre échantillon ne dépasse pas l'âge de 23 ans. Une augmentation de la capacité de la MDT a déjà été observée au-delà de cet âge (Alloway & Alloway, 2013 ; Swanson, 1999), ce que notre échantillon ne permet pas de mettre en évidence.

L'analyse de corrélations a montré que la capacité de rappel, l'âge chronologique et le temps de traitement, au sein des différentes phases interférentes, sont fortement corrélés. L'analyse de similarités a montré que la variance de la capacité de la MDT expliquée par l'âge est essentiellement commune avec la variance expliquée par le temps de traitement. Autrement dit, l'évolution conjointe de l'âge chronologique et du

temps de traitement des phases interférentes prédit la capacité de la MDT. Concrètement, cela signifie que l'âge chronologique affecte le temps du traitement des phases interférentes qui va lui-même influencer la capacité de la MDT. Cela confirme le rôle important du temps de traitement au sein des phases interférentes dans l'évaluation de la capacité de la MDT (Barrouillet & Camos, 2012 ; Bayliss et al., 2005 ; Saito & Miyake, 2004 ; Towse & Hitch, 1995). En effet, plus le temps de traitement est faible, plus le temps de rafraîchissement de la trace mnésique est élevé (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Camos & Barrouillet, 2014). Grâce à des tâches comme celle présentée ici, il est possible de contrôler ce paramètre des tâches interférentes afin qu'il ne biaise pas l'analyse du psychologue clinicien concernant les performances de la MDT de l'individu (Redick et al., 2012 ; Unsworth et al., 2005), en particulier dans une approche développementale. En effet, le rôle joué par le temps passé sur la tâche interférence ne peut pas être contrôlé adéquatement sur une tâche non-informatisée qui défile au rythme du psychologue clinicien.

Il n'existe malheureusement pas d'épreuves d'empan complexe composite disponible en langue française pour les psychologues cliniciens. Il y a également une confusion entre la MCT et la MDT dans les batteries d'évaluation des aptitudes cognitives disponibles comme le WISC-V (Wechsler, 2016). Or, l'évaluation de la capacité de la MDT est une aptitude cognitive cruciale dans les apprentissages (Alloway & Alloway, 2010 ; Barrouillet, Camos, Morlais, & Suchaut, 2008 ; Lépine, Barrouillet, & Camos, 2005). De plus, les tâches d'empan complexe ont l'avantage d'être de bons prédicteurs des aptitudes cognitives comme le raisonnement fluide (Ackerman, Beier, & Boyle, 2005 ; Conway et al., 2005 ; Unsworth et al., 2009 ;

Unsworth & Engle, 2007), la compréhension langagière (Daneman & Carpenter, 1980) ou encore la lecture et les mathématiques (Hitch, Towse, & Hutton, 2001).

Concrètement, dans le cadre de l'accompagnement des élèves en situation de handicap, l'évaluation de la capacité de la MDT pourrait être un atout fondamental dans l'identification des troubles des apprentissages, ainsi que dans l'évaluation de l'impact des aménagements proposés. Notre étude appuie l'idée de développer et de réaliser une normalisation d'une batterie informatisée d'empan complexe multimodale adaptée pour les psychologues cliniciens. De plus, nos résultats montrent que la procédure adaptative pourrait avoir une implication clinique importante dans l'estimation de la capacité de la MDT, et donc la précision du diagnostic. En effet, elle permet d'avoir le même nombre d'essais, quels que soient les performances ou l'âge de l'individu, et d'utiliser une cotation partielle connue comme plus fiable (Conway et al., 2005 ; Redick et al., 2012) et plus adaptée dans une approche développementale (St Clair-Thompson & Sykes, 2010), notamment pour la mise en place de programmes d'accompagnement personnalisés.

Par ailleurs, nous avons proposé un questionnaire à notre échantillon d'enfants et d'adolescents à la fin de la passation, afin de connaître leurs ressentis quant à la difficulté de la tâche. Nos jeunes participants (7 à 16 ans) ont généralement perçu l'ACCES comme une tâche plutôt facile, voire moyennement difficile. De plus, il n'y avait pas de différence significative au niveau de la perception de la difficulté entre les individus ayant de faibles performances en MDT ( $< -1,00$  écart-type) par rapport à ceux ayant des performances élevées en MDT ( $> 1,00$  écart-type). Ces premiers résultats ouvrent la piste à de nombreux travaux, fondamentaux comme appliqués, sur



les liens entre la métacognition et la MDT. Ainsi, ce type d'épreuve est une piste intéressante permettant aux psychologues cliniciens d'obtenir une évaluation multimodale et adaptative de la capacité de la MDT.

## **6. Remerciements**

Cette étude a été financée par le Conseil Régional de Picardie (CRP) et le Fonds Européen au Développement Régional (FEDER). Les auteurs tiennent à remercier tous les étudiants, les enfants, les adolescents ainsi que leur famille qui ont permis cette recherche. Les auteurs remercient Gildas Griffon, principal du collège des Fontaines, Fabien Maniak, principal-adjoint du collège de Ponthieu, Cyril Douay, principal-adjoint du collège Auguste Janvier, André Leblanc, Principal du lycée agricole Le Paraquet, Isabelle Fresneau, chef d'établissement du premier degré de l'école primaire La Salle, Jean-Pierre Carron, chef d'établissement du second degré du collège La Salle, Stéphane Follet, principal et Aurélien Odier principal-adjoint du collège Joliot Curie ainsi que Sophie Beaujouan, psychologue de l'Éducation Nationale. Les auteurs remercient également Julia Janusz, Jordan Lermont et Léo Duplenne pour leur aide dans le recueil des données. Les auteurs tiennent également à remercier chaleureusement Claire Touchet pour ses multiples relectures tout au long de la rédaction de ce manuscrit.

## 7. Références bibliographiques

- Ackerman, P. L., Beier, M. E., & Boyle, M. O. (2005). Working Memory and Intelligence: The Same or Different Constructs? *Psychological Bulletin*, *131*(1), 30–60. doi:10.1037/0033-2909.131.1.30
- Alloway, T. P. (2009). Working Memory, but Not IQ, Predicts Subsequent Learning in Children with Learning Difficulties. *European Journal of Psychological Assessment*, *25*(2), 92–98. doi:10.1027/1015-5759.25.2.92
- Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, *106*(1), 20–29. doi:10.1016/j.jecp.2009.11.003
- Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2013). Working memory across the lifespan: A cross-sectional approach. *Journal of Cognitive Psychology*, *25*(1), 84–93. doi:10.1080/20445911.2012.748027
- Alloway, T. P., Rajendran, G., & Archibald, L. M. D. (2009). Working Memory in Children With Developmental Disorders. *Journal of Learning Disabilities*, *42*(4), 372–382. doi:10.1177/0022219409335214
- Alloway, T. P., Wootan, S., & Deane, P. (2014). Investigating working memory and sustained attention in dyslexic adults. *International Journal of Educational Research*, *67*, 11–17. doi:10.1016/j.ijer.2014.04.001
- Aubry, A. & Bourdin, B. (2017, juillet). *Performance in working memory and attentional networks in gifted children*. Communication présentée au 22nd Biennial World Conference : Global Perspectives in Gifted Education, Sydney, Australie. Abstract retrieved from [https://world-gifted.org/openconf/modules/request.php?module=oc\\_program&action=summary.php&id=148](https://world-gifted.org/openconf/modules/request.php?module=oc_program&action=summary.php&id=148)
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, *63*(1), 1–29. doi:10.1146/annurev-psych-120710-100422
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time Constraints and Resource Sharing in Adults' Working Memory Spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*(1), 83–100. doi:10.1037/0096-3445.133.1.83
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E., & Camos, V. (2007). Time and cognitive load in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *33*(3), 570–585. doi:10.1037/0278-7393.33.3.570
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2001). Developmental Increase in Working Memory Span: Resource Sharing or Temporal Decay? *Journal of Memory and Language*, *45*(1), 1–20. doi:10.1006/jmla.2001.2767
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2012). As Time Goes By: Temporal Constraints in Working Memory. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(6), 413–419. doi:10.1177/0963721412459513

- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., & Camos, V. (2009). Working memory span development: A time-based resource-sharing model account. *Developmental Psychology, 45*(2), 477–490. doi:10.1037/a0014615
- Bayliss, D. M., Jarrold, C., Baddeley, A. D., & Gunn, D. M. (2007). The relationship between short-term memory and working memory: Complex span made simple? *Memory, 13*(3-4), 414–421. doi:10.1080/09658210344000332
- Bayliss, D. M., Jarrold, C., Baddeley, A. D., Gunn, D. M., & Leigh, E. (2005). Mapping the Developmental Constraints on Working Memory Span Performance. *Developmental Psychology, 41*(4), 579–597. doi:10.1037/0012-1649.41.4.579
- Brocki, K. C., & Bohlin, G. (2004). Executive functions in children aged 6 to 13: a dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology, 26*(2), 571–593. doi:10.1207/s15326942dn2602\_3
- Cain, M. K., Zhang, Z., & Yuan, K.-H. (2017). Univariate and multivariate skewness and kurtosis for measuring nonnormality: Prevalence, influence and estimation. *Behavior Research Methods, 49*(5), 1716–1735. doi:10.3758/s13428-016-0814-1
- Calero, M. D., García-Martín, M. B., Jiménez, M. I., Kazén, M., & Araque, A. (2007). Self-regulation advantage for high-IQ children: Findings from a research study. *Journal of Learning Disabilities, 17*(4), 328–343. doi:10.1016/j.lindif.2007.03.012
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2011). Developmental change in working memory strategies: From passive maintenance to active refreshing. *Developmental Psychology, 47*, 898–904. doi:10.1037/a0023193
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie Française, 59*, 21–39. doi:10.1016/j.psfr.2012.12.003
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology, 33*(3), 386–404. doi:10.1016/0022-0965(82)90054-6
- Chiaravalloti, N. D., & DeLuca, J. (2008). Cognitive impairment in multiple sclerosis. *The Lancet Neurology, 7*(12), 1139–1151. doi:10.1016/S1474-4422(08)70259-X
- Chuderski, A. (2013). When are fluid intelligence and working memory isomorphic and when are they not? *Intelligence, 41*(4), 244–262. doi:10.1016/j.intell.2013.04.003
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2003). *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences* (3rd ed.). Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Conklin, H. M., Luciana, M., Hooper, C. J., & Yarger, R. S. (2007). Working memory performance in typically developing children and adolescents: behavioral evidence of protracted frontal lobe development. *Developmental Neuropsychology, 31*(1), 103–128. doi:10.1080/87565640709336889

- Conway, A. R., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*(5), 769–786. doi:10.3758/bf03196772
- Cornoldi, C., & Giofrè, D. (2014). The Crucial Role of Working Memory in Intellectual Functioning. *European Psychologist*, *19*(4), 260–268. doi:10.1027/1016-9040/a000183
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(1), 87–114. doi:10.1017/S0140525X01003922
- Delaloye, C., Ludwig, C., Borella, E., Chicherio, C., & de Ribaupierre, A. (2008). L'Empan de lecture comme épreuve mesurant la capacité de mémoire de travail: normes basées sur une population francophone de 775 adultes jeunes et âgés. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, *58*(2), 89–103. doi:10.1016/j.erap.2006.12.004
- Desmette, D., Hupet, M., Schelstraete, M.-A., & Van der Linden, M. (1995). Adaptation en langue française du « Reading Span Test » de Daneman et Carpenter (1980). *L'Année Psychologique*, *95*(3), 459–482. doi:10.3406/psy.1995.28842
- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science*, *11*(1), 19–23. doi:10.1111/1467-8721.00160
- Engle, R. W., Cantor, J., & Carullo, J. J. (1992). Individual differences in working memory and comprehension: A test of four hypotheses. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*(5), 972–992. doi:10.1037/0278-7393.18.5.972
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, *128*(3), 309–331. doi:10.1037//0096-3445.128.3.309
- Evers, A., Muñiz, J., Bartram, D., Boben, D., Egeland, J., Fernández-Hermida, J. R., et al. (2012). Testing Practices in the 21st Century. *European Psychologist*, *17*(4), 300–319. doi:10.1027/1016-9040/a000102
- Foster, J. L., Shipstead, Z., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2014). Shortened complex span tasks can reliably measure working memory capacity. *Memory & Cognition*, *43*(2), 226–236. doi:10.3758/s13421-014-0461-7
- Fournet, N., Roulin, J.-L., Vallet, F., Beaudoin, M., Agrigoroaei, S., Paignon, A., et al. (2012). Evaluating short-term and working memory in older adults: French normative data. *Aging & Mental Health*, *16*(7), 922–930. doi:10.1080/13607863.2012.674487
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The reading span test and its predictive power for reading comprehension ability. *Journal of Memory and Language*, *51*(1), 136–158. doi:10.1016/j.jml.2004.03.008

- Fry, A. F., & Hale, S. (1996). Processing Speed, Working Memory, and Fluid Intelligence: Evidence for a Developmental Cascade. *Psychological Science*, 7(4), 237–241. doi:10.1111/j.1467-9280.1996.tb00366.x
- Fugate, C. M., Zentall, S. S., & Gentry, M. (2013). Creativity and Working Memory in Gifted Students With and Without Characteristics of Attention Deficit Hyperactive Disorder: Lifting the Mask. *Gifted Child Quarterly*, 57(4), 234–246. doi:10.1177/0016986213500069
- Gathercole, S. E. (1998). The development of memory. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 39(1), 3–27. doi:10.1111/1469-7610.00301
- Gathercole, S. E. (1999). Cognitive approaches to the development of short-term memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(11), 410–419. doi:10.1016/S1364-6613(99)01388-1
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40(2), 177–190. doi:10.1037/0012-1649.40.2.177
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2003). Working memory skills and educational attainment: evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology*, 18(1), 1–16. doi:10.1002/acp.934
- Goldstein, G., Allen, D. N., Thaler, N. S., Luther, J. F., Panchalingam, K., & Pettegrew, J. W. (2014). Developmental aspects and neurobiological correlates of working and associative memory. *Neuropsychology*, 28(4), 496–505. doi:10.1037/neu0000053
- Gonthier, C., Aubry, A., & Bourdin, B. (2017). Measuring working memory capacity in children using adaptive tasks: Example validation of an adaptive complex span. *Behavior Research Methods*, 27(8), 1–12. doi:10.3758/s13428-017-0916-4
- Gonthier, C., Thomassin, N., & Roulin, J.-L. (2015). The composite complex span: French validation of a short working memory task. *Behavior Research Methods*, 48(1), 233–242. doi:10.3758/s13428-015-0566-3
- Hitch, G. J., Towse, J. N., & Hutton, U. (2001). What limits children's working memory span? Theoretical accounts and applications for scholastic development. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 184–198. doi:10.1037/0096-3445.130.2.184
- Holm, S. (1978). A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65–70.
- Hutton, U. M. Z., & Towse, J. N. (2001). Short-term memory and working memory as indices of children's cognitive skills. *Memory*, 9(4-6), 383–394. doi:10.1080/09658210042000058
- Kail, R. (2002). Developmental Change in Proactive Interference. *Child Development*, 73(6), 1703–1714. doi:10.1111/1467-8624.00500
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2000). Working-memory capacity, proactive interference, and divided attention: Limits on long-term memory retrieval. *Journal of*

- Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26(2), 336–358. doi:10.1037//0278-7393.26.2.336
- Kaufman, A. S., & Kaufman, N. L. (2008). *KABC-II : Batterie pour l'examen psychologique de l'enfant - deuxième édition*. Paris : Édition du Centre de Psychologie Appliquée.
- Korkman, M., Kirk, U. & Kemp, S. (2012). *NEPSY-II : Bilan neuropsychologique de l'enfant - seconde édition*. Paris : Édition du Centre de Psychologie Appliquée.
- Lee, J., & Park, S. (2005). Working Memory Impairments in Schizophrenia: A Meta-Analysis. *Journal of Abnormal Psychology*, 114(4), 599–611. doi: 10.1037/0021-843X.114.4.599
- Lépine, R., Barrouillet, P., & Camos, V. (2005). What makes working memory spans so predictive of high-level cognition? *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(1), 165–170.
- Linck, J. A., Osthus, P., Koeth, J. T., & Bunting, M. F. (2014). Working memory and second language comprehension and production: a meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 21(4), 861–883. doi:10.3758/s13423-013-0565-2
- Logie, R. H. (2011). The Functional Organization and Capacity Limits of Working Memory. *Current Directions in Psychological Science*, 20(4), 240–245. doi: 10.1177/0963721411415340
- Loosli, S. V., Rahm, B., Unterrainer, J. M., Weiller, C., & Kaller, C. P. (2014). Developmental Change in Proactive Interference Across the Life Span: Evidence From Two Working Memory Tasks. *Developmental Psychology*, 50(4), 1060–1072. doi:10.1037/a0035231
- Lustig, C., May, C. P., & Hasher, L. (2001). Working memory span and the role of proactive interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 199–207. doi:10.1037//0096-3445.130.2.199
- Luo, D., Thompson, L. A., & Detterman, D. K. (2006). The Criterion Validity of Tasks of Basic Cognitive Processes. *Intelligence*, 34(1), 79–120. doi:10.1016/j.intell.2004.12.003
- Maehler, C., & Schuchardt, K. (2009). Working memory functioning in children with learning disabilities: does intelligence make a difference? *Journal of Intellectual Disability Research*, 53(1), 3–10. doi:10.1111/j.1365-2788.2008.01105.x
- Martinussen, R., Hayden, J., Hogg-Johnson, S., & Tannock, R. (2005). A Meta-Analysis of Working Memory Impairments in Children With Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 44(4), 377–384. doi:10.1097/01.chi.0000153228.72591.73
- McCabe, D. P. (2010). The influence of complex working memory span task administration methods on prediction of higher level cognition and metacognitive control of response times. *Memory & Cognition*, 38(7), 868–882. doi:10.3758/MC.38.7.868
- McCoach, D. B., Rambo, K. E., & Welsh, M. (2012). Assessing the Growth of Gifted Students. *Gifted Child Quarterly*, 57(1), 56–67. doi:10.1177/0016986212463873

- Nimon, K., Oswald, F., & Roberts, K. J. (2013). yhat: Interpreting Regression Effects (version 2.0-0). [Computer software]. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=yhat>
- Numminen, H., Service, E., Ahonen, T., & Ruoppila, I. (2001). Working memory and everyday cognition in adults with Down's syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research, 45*(2), 157–168. doi:10.1046/j.1365-2788.2001.00298.x
- Oswald, F. L., McAbee, S. T., Redick, T. S., & Hambrick, D. Z. (2014). The development of a short domain-general measure of working memory capacity. *Behavior Research Methods, 47*(4), 1343–1355. doi:10.3758/s13428-014-0543-2
- Peirce, J. W. (2007). PsychoPy—Psychophysics software in Python. *Journal of Neuroscience Methods, 162*(1), 8–13. doi:10.1016/j.jneumeth.2006.11.017
- Redick, T. S., Broadway, J. M., Meier, M. E., Kuriakose, P. S., Unsworth, N., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2012). Measuring Working Memory Capacity With Automated Complex Span Tasks. *European Journal of Psychological Assessment, 28*(3), 164–171. doi:10.1027/1015-5759/a000123
- Redick, T. S., Shipstead, Z., Meier, M. E., Montroy, J. J., Hicks, K. L., Unsworth, N., et al. (2016). Cognitive predictors of a common multitasking ability: Contributions from working memory, attention control, and fluid intelligence. *Journal of Experimental Psychology: General, 145*(11), 1473–1492. doi:10.1037/xge0000219
- Roberts, K. L., Strait, J. A. E., & Decker, S. L. (2018). Developmental Trajectories of Verbal, Static Visual-Spatial, and Dynamic Visual-Spatial Working Memory. *Contemporary School Psychology, 106*(1), 1–10. doi:10.1007/s40688-018-0176-z
- Rosseel, Y. (2012). lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software, 48*(2). doi:10.18637/jss.v048.i02
- Saito, S., & Miyake, A. (2004). On the nature of forgetting and the processing–storage relationship in reading span performance. *Journal of Memory and Language, 50*(4), 425–443. doi:10.1016/j.jml.2003.12.003
- Siegel, L. S., & Ryan, E. B. (1989). The Development of Working Memory in Normally Achieving and Subtypes of Learning Disabled Children. *Child Development, 60*(4), 973–978. doi:10.2307/1131037
- Seigneuric, A., De Guibert, M., Megherbi, H., Potier, D., & Picard, A. (2009). La MTVE : une épreuve de mémoire de travail verbale chez l'enfant adaptée du Listening Span Task de Siegel et Ryan (1989). *L'Année Psychologique, 108*(02), 273–308. doi:10.4074/S0003503308002042
- St Clair-Thompson, H. L. (2007). The influence of strategies on relationships between working memory and cognitive skills. *Memory, 15*(4), 353–365. doi:10.1080/09658210701261845
- St Clair-Thompson, H. L., & Allen, R. J. (2013). Are forward and backward recall the same? A dual-task study of digit recall. *Memory & Cognition, 41*(4), 519–532. doi:10.3758/s13421-012-0277-2

- St Clair-Thompson, H., & Sykes, S. (2010). Scoring methods and the predictive ability of working memory tasks. *Behavior Research Methods*, 42(4), 969–975. doi:10.3758/BRM.42.4.969
- Swanson, H. L. (1999). What develops in working memory? A life span perspective. *Developmental Psychology*, 35(4), 986–1000. doi:10.1037/0012-1649.35.4.986
- Tamnes, C. K., Walhovd, K. B., Grydeland, H., Holland, D., Østby, Y., Dale, A. M., & Fjell, A. M. (2013). Longitudinal Working Memory Development Is Related to Structural Maturation of Frontal and Parietal Cortices. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(10), 1611–1623. doi:10.1162/jocn\_a\_00434
- Thaler, N. S., Goldstein, G., Pettegrew, J. W., Luther, J. F., Reynolds, C. R., & Allen, D. N. (2013). Developmental aspects of working and associative memory. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 28(4), 348–355. doi:10.1093/arclin/acs114
- Towse, J. N., & Hitch, G. J. (1995). Is there a Relationship between Task Demand and Storage Space in Tests of Working Memory Capacity? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 48(1), 108–124. doi:10.1080/14640749508401379
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (1998). A Reevaluation of Working Memory Capacity in Children. *Journal of Memory and Language*, 39(2), 195–217. doi:10.1006/jmla.1998.2574
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2007). On the division of short-term and working memory: An examination of simple and complex span and their relation to higher order abilities. *Psychological Bulletin*, 133(6), 1038–1066. doi:10.1037/0033-2909.133.6.1038
- Unsworth, N., Heitz, R. P., Schrock, J. C., & Engle, R. W. (2005). An Automated Version of the Operation Span Task. *Behavior Research Methods*, 37(3), 498–505. doi:10.3758/BF03192720
- Van Viersen, S., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Bree, E. H. (2016). High Reading Skills Mask Dyslexia in Gifted Children. *Journal of Learning Disabilities*, 49(2), 189–199. doi:10.1177/0022219414538517
- Vock, M., & Holling, H. (2008). The measurement of visuo-spatial and verbal-numerical working memory: Development of IRT-based scales. *Intelligence*, 36(2), 161–182. doi:10.1016/j.intell.2007.02.004
- Wechsler, D. (2016). *Manuel de l'échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants (5e éd.)*. Paris : Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Weiss, D. J. (1982). Improving Measurement Quality and Efficiency with Adaptive Testing. *Applied Psychological Measurement*, 6(4), 473–492. doi:10.1177/014662168200600408
- Wilhelm, O., Oberauer, K., Hildebrandt, A., & Conway, A. (2013). What is working memory capacity, and how can we measure it? *Frontiers in Psychology*, 4, 1–22. doi:10.3389/fpsyg.2013.00433



Wu, K. K., Chan, S. K., Leung, P. W. L., Liu, W.-S., Leung, F. L. T., & Ng, R. (2011). Components and developmental differences of executive functioning for school-aged children. *Developmental Neuropsychology*, 36(3), 319–337. doi: 10.1080/87565641.2010.549979

### **3.2. La capacité de mémoire de travail, l'intelligence et le haut potentiel intellectuel**

Le lien entre la capacité de la mémoire de travail et l'intelligence est très largement documenté (Ackerman et al., 2005 ; Chuderski, 2013 ; Colom, Abad, Quiroga, Shih, & Flores-Mendoza, 2008 ; Cornoldi & Giofrè, 2014 ; Engle, et al., 1999 ; Giofrè et al., 2013 ; Kane et al., 2005). Ces deux construits sont fortement liés. Cela indique des processus cognitifs communs. Dans la littérature, la détermination de ces processus cognitifs expliquant ce lien reste toutefois fortement débattue. La plupart des recherches ont investigué 3 types de processus cognitifs pouvant être impliqués dans cette relation : 1) la vitesse de traitement ; 2) les processus exécutifs impliquant les capacités attentionnelles ; 3) le stockage temporaire des informations.

De nombreuses études ont montré que la relation de la mémoire de travail et l'intelligence serait induite par la vitesse de traitement (Fry & Hale, 2000). En effet, les tâches simples de réaction et les capacités intellectuelles sont modérément liées (voir Grudnik & Kranzler, 2001 pour une méta-analyse). Les enfants à haut potentiel intellectuel présentent des performances très élevées dans les tâches de réaction simple, indiquant ainsi une meilleure vitesse de traitement que leurs pairs du même âge (Duan et al., 2013 ; Duan, Shi, & Dan, 2009 ; Kranzler et al., 1994 ; Paz-Baruch et al., 2014). Cela confirme le lien significatif entre la vitesse de traitement et les capacités intellectuelles (voir Sheppard & Vernon, 2008 pour une revue). Cette corrélation entre cette aptitude cognitive et l'intelligence expliquerait la quantité d'informations disponibles dans la mémoire de travail (Kail, 2007 ; Wilhelm & Oberauer, 2006). Autrement dit, la vitesse de traitement permettrait de réaliser rapidement les tâches interférentes et empêcherait ainsi la dégradation temporelle des informations stockées

en mémoire de travail (Barrouillet et al., 2004 ; Cowan et al., 2003). Cependant, les mesures de la vitesse de traitement peuvent faire intervenir les ressources attentionnelles (Cornoldi & Giofrè, 2014). Cette implication de l'attention expliquerait ainsi cette relation entre les capacités intellectuelles et la mémoire de travail.

Certaines études ont montré que les capacités attentionnelles seraient impliquées dans le fonctionnement de la mémoire de travail et dans celui de l'intelligence (Engel de Abreu, Conway, & Gathercole, 2010 ; Gray et al., 2017). Plus précisément, ce serait les mécanismes de contrôle cognitif qui seraient à l'origine de ce lien (Conway et al., 2002 ; Kane et al., 2004). Parmi ces mécanismes, le contrôle exécutif semble être impliqué dans la variation interindividuelle des performances en mémoire de travail (Redick & Engle, 2006). Il permettrait de réactiver les informations brièvement stockées et de gérer les interférences (Cowan, 2001 ; Engle et al., 1999). Cette capacité attentionnelle serait également présente dans les tâches d'évaluation des capacités intellectuelles (Engle, 2018). En effet, ce type d'évaluation repose généralement sur la résolution de problèmes. Cela nécessite donc d'analyser les problèmes posés afin d'appliquer une stratégie la plus adaptée possible, de surveiller et de maintenir les résultats intermédiaires pour ajuster la stratégie utilisée selon la progression de la résolution du problème. Ainsi, le contrôle exécutif jouerait un rôle important à la fois dans le fonctionnement de la mémoire de travail et dans celui de l'intelligence. De plus, les capacités attentionnelles, telles que le contrôle exécutif, ne sont pas tributaires de la modalité des informations manipulées (Baddeley et Hitch, 1974 ; Cowan, 1988 ; 2001). En d'autres termes, l'attention serait un domaine cognitif général pouvant intervenir dans les capacités de la mémoire de travail et de l'intelligence (Conway &

Kovacs, 2015). Le contrôle exécutif correspondrait donc à la variance commune entre ces 2 construits.

À l'inverse, certaines études ont montré que ce n'était ni la vitesse de traitement ni les capacités attentionnelles qui expliqueraient le lien entre la mémoire de travail et l'intelligence (Buehner, Krumm, & Pick, 2005). En effet, une série de recherches ont montré que la fonction de stockage temporaire expliquerait la relation entre ces 2 construits (Buehner et al., 2005 ; Colom et al., 2008 ; Chuderski, Taraday, Nęcka, & Smoleń, 2012). Selon ces études, la capacité limitée du stockage temporaire serait le meilleur prédicteur des capacités intellectuelles (Colom, Rebollo, Abad, & Shih, 2006). Colom et collaborateurs (2005) ont montré que le retrait de la variance liée au stockage temporaire implique une forte diminution du lien entre les performances en mémoire de travail et les capacités intellectuelles. Selon ces études, la capacité limitée des informations temporairement disponibles correspondrait ainsi à la variance commune entre la mémoire de travail et l'intelligence.

En résumé, la capacité de la mémoire de travail est fortement liée aux capacités intellectuelles. De nombreuses études ont montré que les enfants à haut potentiel intellectuel ont de meilleures performances en mémoire de travail que les enfants au développement typique (Calero et al., 2007 ; Hoard et al., 2008 ; Johnson et al., 2003 ; Leikin, Paz-Baruch, & Leikin, 2013 ; van Viersen et al., 2014). Ces résultats montrent que la capacité de la mémoire de travail semble être une caractéristique fondamentale des enfants à haut potentiel intellectuel (Hoard et al., 2008 ; Kornmann et al., 2015 ; Vock & Holling, 2008). Cependant, la raison de la relation entre l'intelligence et la mémoire de travail fait l'objet de nombreux débats. À ce jour, peu d'études ont exploré

les liens entre les capacités intellectuelles élevées des enfants à haut potentiel et leurs performances en mémoire de travail.

**ARTICLE 4 - EXPLAINING THE HIGH WORKING MEMORY CAPACITY OF GIFTED CHILDREN: CONTRIBUTIONS OF PROCESSING SKILLS AND EXECUTIVE CONTROL**

La mémoire de travail est une capacité cognitive importante chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Cependant, peu d'études ont exploré les raisons de leur capacité élevée de la mémoire de travail. Dans la population générale, les déterminants de la capacité de la mémoire de travail sont relativement bien documentés. Bien que le lien entre l'intelligence et la capacité de la mémoire de travail soit fort (Ackerman et al., 2005 ; Chuderski, 2013 ; Cornoldi & Giofrè, 2014 ; Kane et al., 2005), cette corrélation semble diminuer lorsque les capacités intellectuelles augmentent (Alloway & Elsworth, 2012). Cela suggère que la capacité de la mémoire de travail se comporterait différemment chez les enfants à haut potentiel intellectuel. De nombreuses études ont également montré que le développement cognitif de ces enfants est particulier (Corbin et al., 2013 ; Steiner & Carr, 2003 ; Vaivre-Douret, 2011). Ces caractéristiques développementales pourraient ainsi induire des causes spécifiques de leur capacité élevée de la mémoire de travail. L'objectif de cette dernière étude est d'investiguer les déterminants des performances en mémoire de travail chez les enfants à haut potentiel intellectuel par rapport aux enfants au développement typique.

De nombreuses études ont montré l'implication du contrôle exécutif dans le fonctionnement de la mémoire de travail (McCabe, Roediger, McDaniel, Balota, & Hambrick, 2010 ; Unsworth, & Spillers, 2010). En effet, le contrôle exécutif expliquerait une partie importante de la variation inter-individuelle de la capacité en mémoire de travail chez les jeunes adultes (e.g. Redick & Engle, 2006) et les enfants au développement typique (Cowan et al., 2005). Les enfants à haut potentiel

intellectuel présentent des performances élevées dans les tâches impliquant le contrôle exécutif (Duan et al., 2009 ; Liu, Xiao, Shi, & Zhao, 2011a ; 2011b). Cet aspect de l'attention semble être une caractéristique cognitive importante chez les enfants à haut potentiel intellectuel durant l'enfance jusqu'au début de l'adolescence (Aubry & Bourdin, 2018). Leur capacité élevée au contrôle exécutif pourrait ainsi expliquer leurs performances dans les tâches de mémoire de travail. À notre connaissance, aucune étude n'a exploré le lien entre la capacité de la mémoire de travail et le contrôle exécutif chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Ces enfants démontrent également une vitesse de traitement plus élevée que leurs pairs (Duan et al., 2013 ; Johnson et al., 2003). Certains auteurs affirment que la vitesse de traitement est un élément essentiel dans le développement de la capacité de la mémoire de travail (Fry & Hale, 2000 ; Camos & Barrouillet, 2014). Ainsi, elle peut également expliquer la performance élevée en mémoire de travail des enfants à haut potentiel intellectuel par rapport à leurs pairs du même âge.

Nous avons choisi de d'étudier le lien entre la capacité de la mémoire de travail et les capacités attentionnel en nous basant sur le modèle des 3 réseaux attentionnels (Pertersen & Posner, 2012), c'est-à-dire l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif (voir la section 2 pour plus de détails). Nous avons donc utilisé l'Attention Network Test (ANT ; Fan et al., 2002) afin d'estimer les performances de chaque réseau attentionnel des enfants ayant ou non un haut potentiel intellectuel. Ce type de tâche attentionnelle est idéal pour estimer simultanément l'efficacité des réseaux d'alerte, d'orientation et de contrôle exécutif, et pour comparer les performances de chaque réseau attentionnel chez des populations ayant des niveaux de capacités intellectuelles différents. En effet, l'ANT ne requiert pas de processus de raisonnement élevé. Redick

et Engle (2006) ont montré des liens entre l'ANT et la capacité de la mémoire de travail. À notre connaissance, cette présente étude est la première à investiguer le lien entre les réseaux attentionnels estimés par l'ANT et les performances en mémoire de travail chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Un autre aspect central de notre étude est la méthode d'évaluation de la mémoire de travail avec l'utilisation d'une tâche d'empan complexe adaptative (*Adaptive Composite Complex Span*, ACCES ; Gonthier et al., 2017). En effet, elle permet d'estimer le domaine général de la capacité de la mémoire de travail avec une procédure adaptative (voir Article 3 pour plus de détails).

Cinquante-cinq enfants à haut potentiel intellectuel, âgés en moyenne de 11 ans et 10 mois ( $\pm 1$  ans et 4 mois), et 55 enfants au développement typique âgés en moyenne de 11 ans et 11 mois ( $\pm 1$  ans et 3 mois) ont participé à cette étude. Aucun participant n'avait de troubles des apprentissages avérés. Les enfants à haut potentiel intellectuel ont été identifiés avec un Indice d'Aptitude Générale (IAG) supérieur à 125 aux échelles de Wechsler (WISC-IV), ou un score supérieur au 95<sup>e</sup> centile aux Matrices Progressives de Raven (Raven et al., 1998). Concernant le groupe d'enfants au développement typique, tous les enfants avaient un score compris entre le 15<sup>e</sup> et le 85<sup>e</sup> centile aux Matrices Progressives de Raven (Raven et al., 1998).

Tous les participants ont ainsi réalisé la tâche d'empan complexe adaptative, ACCES, (Gonthier et al., 2017) pour évaluer la capacité de la mémoire de travail, et l'ANT (Rueda et al., 2004) pour estimer les performances aux réseaux attentionnels. Les résultats ont confirmé que les enfants à haut potentiel intellectuel avaient de meilleures performances en mémoire de travail que leurs pairs de même âge. Leurs



capacités élevées de la mémoire de travail semblent être médiatisées par leurs rapidité de réalisation de la tâche interférente, plutôt que par leurs capacités élevées au contrôle exécutif. Par conséquent, les processus non attentionnels semblent être impliqués dans la distinction entre les enfants à haut potentiel intellectuel et les enfants au développement typique. Il serait donc intéressant d'explorer d'autres facteurs liés au rafraîchissement des informations maintenues en mémoire de travail, comme l'utilisation de stratégies mnésiques ou leur connaissances métacognitives.

# Explaining the high working memory capacity of gifted children: Contributions of processing skills and executive control

Alexandre Aubry <sup>1</sup>, Corentin Gonthier <sup>2</sup> et Béatrice Bourdin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Picardie Jules Verne, EA7273 CRP-CPO, Amiens, France

<sup>2</sup> Université Rennes 2, LP3C EA 1285, Rennes, France

Soumis pour publication dans la revue *High Ability Studies*

Preprint disponible sur *PsyArXiv*, doi:10.17605/OSF.IO/YEQNZ

Running title: WMC in Gifted Children

**Keywords:** working memory capacity; gifted children; attention networks test; executive attention; processing time

## **Abstract**

Intellectually gifted children tend to demonstrate especially high working memory capacity, an ability that holds a critical role in intellectual functioning. What could explain the differences in working memory performance between intellectually gifted and non-gifted children? We investigated this issue by measuring working memory capacity with complex spans in a sample of gifted and non-gifted children. Based on prior studies, we expected the higher working memory capacity of intellectually gifted children to be driven by more effective executive control, as measured with the Attention Networks Test. The findings confirmed that intellectually gifted children had higher working memory capacity than typical children, as well as more effective executive attention. Surprisingly, however, working memory differences between groups were not mediated by differences in executive attention. Instead, differences in processing time from the working memory task contributed to the high working memory capacity of gifted children.

## **1. Introduction**

Working memory can be viewed as the workspace of cognition, where we briefly store and manipulate information during cognitive activity (Baddeley & Hitch, 1974). Conceptually, a high working memory capacity is thought to facilitate complex cognitive processing by allowing for the integration of more complex information (Oberauer, Süß, Wilhelm & Sander, 2008). The role of working memory seems to be important in learning and education in children (see Cowan, 2013 for a discussion), and is an important predictor of academic achievement (Alloway & Alloway, 2010 ; Gathercole et al., 2004 ; Krumm, Ziegler, & Buehner, 2008).

Working memory span increases throughout childhood until adolescence, along with cognitive efficiency (Gathercole, Pickering, Ambridge, & Wearing, 2004; Roberts, Strait, & Decker, 2018; Thaler et al., 2013). The literature has often reported on the strong relationship with between working memory capacity and the development of high-level cognitive activities, such as mathematical processing (see Raghubar, Barnes, & Hecht, 2010 for a review) and reading comprehension (Daneman & Carpenter, 1980; Nouwens, Groen, & Verhoeven, 2016; Seigneuric & Ehrlich, 2005). Working memory capacity is also strongly related to fluid intelligence (Ackerman, Beier, & Boyle, 2005), even in children (Giofrè, Mammarella, & Cornoldi, 2013).

Many studies have shown that intellectually gifted children consistently demonstrate higher working memory capacity than intellectually typical children, (Calero, García-Martín, Jiménez, Kazén, & Araque, 2007; Hoard, Geary, Byrd-Craven, & Nugent, 2008; Leikin, Paz-Baruch, & Leikin, 2013; van Viersen, Kroesbergen, Slot,

& de Bree, 2014). In other words, effective working memory seems characteristic of intellectual giftedness (Hoard et al., 2008; Kornmann, Zettler, Kammerer, Gerjets, & Trautwein, 2015; Vock & Holling, 2008 ). However, the precise mechanism behind the superior working memory capacity of gifted children is unknown.

What process could lead gifted children to perform higher in working memory tests? While determinants of working memory capacity in the general population are relatively well-known, the correlation between IQ and working memory capacity tends to decrease as intelligence increases (Alloway & Elsworth, 2012), suggesting that individual differences in working memory capacity may behave differently in gifted children. Besides, gifted children have atypical development, with specific cognitive and non-cognitive characteristics (Corbin, Borel, & Camos, 2013; Delisle, 1990; Steiner and Carr, 2003), leading to several possible causes for their higher working memory capacity.

In contrast with short-term memory, working memory involves both storage and control mechanisms. This has led some authors to consider that working memory performances issues from the combination of short-form memory and executive attention components (Baddeley, 2000; Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004; Engle, Tuholski, Laughlin, & Conway, 1999; Logie, 2011). The executive attention system is essential to inhibit irrelevant information and switch attention between to-be-remembered items and concurrent processing (Kane & Engle, 2003). Executive attention is one of the main determinant of working memory capacity, and a major contributor at its relationship with high-level cognition (McCabe, Roediger, McDaniel, Balota, & Hambrick, 2010; Unsworth, & Spillers, 2010). Individual differences in

working memory capacity are consistently related to executive attention, both in young adults (e.g. Redick & Engle, 2006) and in typically developing children (Cowan et al., 2005). In parallel, Intellectually gifted children seem to outperform typical children in tasks involving executive attention (Duan, Shi, Wu, Mou, Cui, & Wang, 2009; Liu, Xiao, Shi, & Zhao, 2011a, 2011b). These findings suggest that executive attention could explain their high working memory capacity, although to our knowledge no study has evaluated both executive attention and working memory capacity in gifted children.

Although the importance of executive attention for working memory is well-established in the literature, other factors influence working memory capacity and could contribute to the higher performance of gifted children. To illustrate these factors, it is necessary to examine the nature of working memory tasks. In psychological research, working memory capacity is usually estimated based on complex span tasks (Conway, Kane, Bunting, Hambrick, Wilhelm, Engle, 2005; Redick et al., 2012). Complex spans require both storage of simple stimuli (such as a letter or a digit) and concurrent processing (such as reading a sentence or solving a simple operation), which directly echoes the definition of working memory. To succeed in such a task, it is necessary to memorize a series of to-be-remembered items as effectively as possible; it is also necessary to perform the concurrent processing tasks as quickly as possible so as to leave time for the refreshing of memory traces.

## **2. Objective of The Present Study**

The overarching goal of the current study was to investigate in detail the performance of Intellectually gifted children in complex span tasks and to explore the

possible sources of their high working memory spans. Given that executive attention is often regarded as the main determinant of working memory capacity (McCabe, Roediger, McDaniel, Balota, & Hambrick, 2010) and seems to be more effective in gifted children (Duan et al., 2009; Liu et al., 2011a, 2011b), our primary hypothesis was that executive attention would drive the working memory capacity of these children. Because gifted children also demonstrate higher processing speed (Duan et al., 2013), we also examined the effect of processing times on the working memory capacity of these children.

Prior studies of executive attention in gifted children have used specialized experimental paradigms in the context of electrophysiological studies (Duan et al., 2009; Liu et al., 2011a, 2011b). By contrast, we elected to base the present study on the widespread tripartite model of attentional functioning and the corresponding experimental paradigm. Executive attention can be viewed as an attentional network coexisting with two other independent attentional networks (Petersen and Posner, 2012): alerting, defined as achieving an alert state, and orienting, defined as the orientation of attention towards sensory input (Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002). The Attention Network Test (ANT) was elaborated to assess each attentional network separately (Fan et al., 2002). This task requires the activation of all three attentional networks to respond to simple stimuli while ignoring distractors; it does not require high-level reasoning processes, which makes it well-suited to the comparison of gifted and typical children. While flanker tasks in general (Heitz & Engle, 2007; Shipstead, Harrison, & Engle, 2012; Unsworth & Spillers, 2010) and the ANT in particular (Redick & Engle, 2006) have demonstrated a relationship with WMC in previous studies, the ANT has never been used in intellectually gifted

children to estimate the efficiency of their attentional networks. The current study strived to explore the efficiency of attentional networks as they relate to working memory span in intellectually typical and gifted children. We expected the two groups to specifically differ in terms of executive attention performance, not alerting and orienting; we also expected executive attention performance to mediate the difference between the two groups in terms of working memory capacity.

A central aspect of the present study was the method for assessing working memory capacity. Although most working memory tasks are verbal or visuo-spatial in nature, working memory actually constitutes a domain-general construct (Kane, Hambrick, Tuholski, Wilhelm, Payne, & Engle, 2004). As a consequence, the recommended way to measure working memory capacity is to combine multiple working memory tasks so as to obtain a single score limiting the influence of task-specific factors (Foster, Shipstead, Harrison, Hicks, Redick, & Engle, 2014). This approach was adopted in the present study.

Another important point is that prior studies have measured working memory capacity in gifted children using an ascending procedure: participants begin with moderate difficulty trials, the number of to-be-remembered items increases progressively, and the task is cut short when the participant fails a certain number of trials (Hoard, Geary, Byrd-Craven, & Nugent, 2008; Kornmann, Zettler, Kammerer, Gerjets, & Trautwein, 2015; van Viersen, Kroesbergen, Slot, & de Bree, 2014). This ascending order of difficulty poses several problems when assessing the abilities of extreme groups such as intellectually gifted children. High-ability children must succeed on many easy trials before reaching an appropriate level of difficulty. Thus, the



ascending order of difficulty can cause fatigue and frustration for high-ability children (e.g. Vandierendonck, De Vooght, & Van der Goten, 1998). These issues can lead to underestimation of working memory performance in intellectually gifted children. In this type of task, participants with high WMC can fail at the easy trials out of boredom. (see Gonthier et al., 2017 for a detailed discussion of these issues). Ceiling effects are also a recurring issue in the context of intellectual giftedness (McCoach, Rambo, & Welsh, 2012 ; Vock & Holling, 2008,). To obtain an appropriate measure of working memory capacity, suitable for both typical and gifted children, we developed an adaptive, multimodal complex span task (Gonthier et al., 2017), which was used in the present study.

A final noteworthy aspect of the present study was the criterion for classifying children as gifted. Methods for the identification of intellectually gifted children vary across studies: possible criteria include, for example, high verbal ability scores (Alloway & Elsworth, 2012; Dark & Benbow, 1994), nomination by a teacher (Kornmann et al., 2015), or high IQ (Calero et al., 2007; Leikin et al., 2013; van Viersen et al., 2016). These diverse conceptions of giftedness can bias the assessment of cognitive functioning in gifted children. Most conceptions of giftedness are based on the idea of general cognitive ability, operationalized as having a high IQ (McClain & Pfeiffer, 2012; Warne, 2016). The present study followed this conception, and used intelligence tests to identify children as gifted.

### 3. Methods

#### 3.1. Participants

A sample of 55 intellectually gifted children (mean age = 11.80 years, SD = 1.36, 22 females) and 55 nongifted children (mean age = 11.89 years, SD = 1.24, 22 females) participated in the study. The groups did not significantly differ in terms of age,  $t(108) = -0.183$ ,  $p = .855$ ,  $d = -0.035$ . No children had known learning disorders; all had normal or corrected vision, and all were native French speakers. Participants were recruited in elementary and middle schools. The experiment was performed in compliance with local ethics regulations. Signed informed consent was provided by all legal guardians in accordance with the Declaration of Helsinki. Before testing took place, the objectives of the study were explained to the children, who then gave oral agreement for their participation.

The inclusion criterion for children in the gifted group was IQ strictly above 125, corresponding to the 95th percentile (mean IQ = 139.64, SD = 8.27, skewness = 0.08, kurtosis = -0.57). IQ was estimated with Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-IV; Wechsler, 2005) or with Raven's Standard Progressive Matrices (RSPM; Raven, Raven, & Court, 1998), in line with current recommendations (Assouline, Foley Nicpon, & Whiteman, 2009; Aubry & Bourdin, 2018; McIntosh, Dixon, & Pierson, 2012). For forty-five children in the gifted group, IQ was estimated with the Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-IV, Wechsler, 2005) by a clinical psychologist in the context of a psychological assessment aiming to identify intellectual giftedness; results of the WISC-IV were unavailable for the remaining ten gifted children, for whom IQ was estimated by RSPM. Children in the nongifted group

all had IQ between 85 and 115 ( $M = 103.20$ ,  $SD = 5.64$ , skewness =  $-0.09$ , kurtosis =  $-0.84$ ); IQ was estimated with RSPM in all cases.

### **3.2. Measures**

**Working Memory.** Domain-general working memory capacity was measured with a battery of three computerized complex span tasks, the Adaptive Composite Complex Span (ACCES; Gonthier, Aubry & Bourdin, 2017). This task has demonstrated adequate psychometric qualities in a sample of 268 French-speaking children (Gonthier et al., 2017). The ACCES is composed of the three most common complex span tasks: the reading span, symmetry span, and operation span (Redick et al., 2012). All tasks follow the same structure: participants have to alternate between solving simple problems, and memorizing unrelated stimuli presented after each problem. At the end of each trial, participants are asked to recall all to-be-remembered stimuli in the same order.

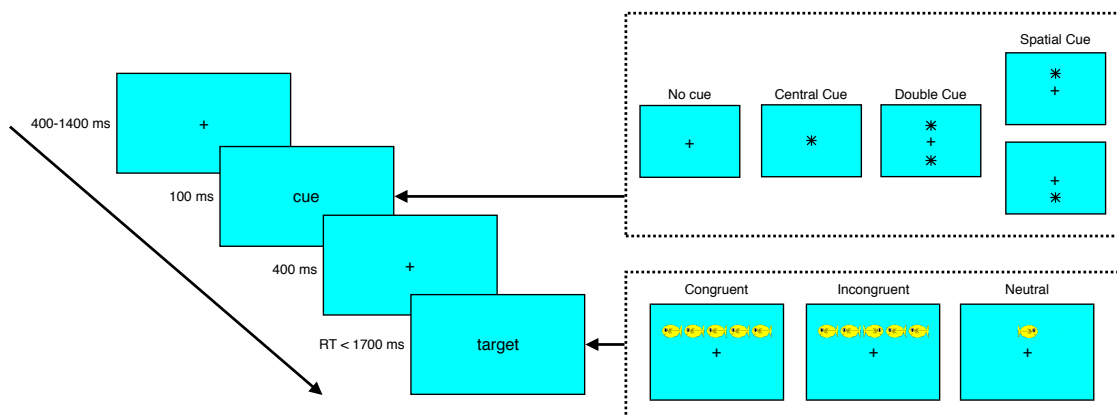
The reading span task required participants to decide whether sentences are semantically plausible (e.g. "Les violons font des bulles" / "Violins make bubbles") and to memorize single digits; the symmetry span task required participants to decide whether geometric displays are symmetric and to memorize the location of red squares in a 4x4 grid; lastly, the operation span task required participant to decide whether simple equations are correct (e.g.  $2 + 3 = 3$ ) and to memorize consonants chosen to be phonetically distinctive in French. For each complex span task, participants first trained to memorize stimuli, solve problems, and do both tasks at once. They then performed 6 target trials. The number of stimuli to remember varied adaptively as a

function of participant performance on the previous trial, with a minimum of 2 and a maximum of 8 (see Gonthier et al., 2017 for details).

Participants performed the reading span, symmetry span and operation span, in order. Working memory span scores were determined for each complex span as the total number of stimuli correctly recalled in the correct position (Conway, Kane, Bunting, Hambrick, Wilhelm, & Engle, 2005). Scores on the three complex span tasks were standardized and then averaged to produce a single, composite working memory capacity score. Accuracy and median response times on correctly answered processing problems in the three complex span tasks were also retrieved for each participant. To ensure that participants performed both component of the complex spans correctly, the data from a subtest were excluded if processing accuracy scores were in the bottom fifth percentile of the sample, and working memory capacity was computed from the other two subtests (Gonthier, Thomassin, & Roulin, 2015; Unsworth et al., 2005) This occurred for 18 participants (3 gifted and 15 nongifted children). No participant failed to meet this processing accuracy threshold on two subtests or more.s

Attentional abilities. The Attention Network Test (ANT; Rueda et al., 2004) was used to estimate the efficiency of three independent attentional networks: alerting, orienting and executive control. The present task was directly based on the classic version of the paradigm (Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002). The stimuli were fish pointing towards the left or right of the screen (as used in the child version of the ANT ). Children were required to indicate the direction of target fish by pressing the left or right arrow keys on a keyboard.

The procedure of the ANT is illustrated in Figure 1. Each trial represented one of 12 possible conditions in equal proportion: 4 types of cues (no cue, central cue, double cue or valid spatial cue) x 3 types of targets (congruent, incongruent or neutral). Each trial began with a fixation cross displayed for a random duration (between 400 and 1400 ms). One of the four possible cues then appeared for 100 ms. After the disappearance of this cue, only the fixation cross was visible for 400 ms. Lastly, a target fish appeared, either alone (neutral condition) or among other fish pointing in the same (congruent condition) or the opposite direction (incongruent condition). Children then had to press the button corresponding to the direction of the target fish within a 1700 ms delay. The task began with a training phase of 24 trials, including feedback. Children then performed three experimental blocks of 96 trials without feedback, with a 5-second break between each block.



**Fig 1. Procedure for the Attention Network Test.**

For each participant, average accuracy and median response times were recorded for each condition. Response times were considered only for correct trials; RTs faster than 200 ms or slower than 1700 ms were considered as anticipation and omission errors and excluded from the computation (approximately 0.56 % of trials).

The efficiency of overall attentional system was estimated by the proportion of errors and the average of response time in all conditions. Performance of the three attentional networks were then estimated by contrasting performance in two conditions (Fan et al., 2002; Rueda et al., 2004; MacLeod, Lawrence, McConnell, Eskes, Klein, & Shore, 2010). For the alerting system, average performance in the no cue condition was subtracted from the double cue condition; for the orienting system, the central cue condition was subtracted from the valid cue condition; for the executive control system, the incongruent condition was subtracted from the congruent condition. A linear integrated speed-accuracy score (LISAS; Vandierendonck, 2017) was used to estimate performance in each of the three attentional networks. The LISAS integrates speed and accuracy and provides an accurate representation of cognitive processing; it also tends to be more reliable than either speed or accuracy scores (Hughes, Linck, Bowles, Koeth, & Bunting, 2013; Vandierendonck, 2017, 2018; Yang, Yang, & Kang, 2014). In addition, combining speed and accuracy improves the detection of any relationship between working memory capacity and attentional performance (Draheim, Hicks, & Engle, 2016). LISAS were computed with this formula in each condition (Vandierendonck, 2017, 2018):

$$LISAS = RT_{Condition} + \frac{SD_{RT_{Total}}}{SD_{PE_{Total}}} \times PE_{Condition}$$

where  $RT_{Condition}$  and  $PE_{Condition}$  are the mean of median response times and the proportion of errors in a specific condition (i.e. no cue, double cue, spatial cue, central cue, congruent and incongruent trials).  $SD_{RT_{Total}}$  and  $SD_{PE_{Total}}$  are the overall standard deviation of the response time and the proportion of errors throughout the task. If

$SD_{PE_{Total}}$  or  $PE_{Condition}$  is equal to zero, LISAS corresponds to  $RT_{Condition}$  only (Vandierendonck, 2018).

#### **4. Procedure**

Participants performed the experiment collectively in two testing sessions. The sessions were separated by no more than one week. During the first session, children performed the ACCES and ANT tasks. The ACCES took on average 35 minutes and the ANT approximately 20 minutes. During the second session, all children whatever the group performed RSPM with a limited time of 30 minutes.

#### **5. Data Analysis**

The data and R scripts needed to replicate the statistical analyses are available on the Open Science Framework platform at <https://osf.io/y48uc/>. A first series of analyses examined whether the gifted and nongifted groups differed in terms of overall working memory capacity, processing times and processing accuracy on the working memory task, and in terms of scores for the three attentional networks. These analyses were performed based on the general linear model, using between-subjects ANOVAs and mixed-design ANOVAs (with Greenhouse-Geisser correction when appropriate). Post-hoc tests were performed using Tukey's HSD. Effects sizes were computed using eta squared and partial eta squared.

A second series of analyses examined whether the difference in working memory capacity between the gifted and nongifted groups was mediated by the processing efficiency and attentional network scores. These analyses were based on bootstrap tests for multiple mediation (Preacher & Hayes, 2004, 2008). Indirect effects were estimated using the lavaan package (Rosseel, 2012; bias-corrected method with 20000 bootstrap

samples). This approach provides 95% confidence intervals for direct and indirect effects; an effect is significant at the  $p < .05$  level if the 95% confidence interval does not include zero. Indirect effects were estimated based on all available data (i.e. using the full sample for all putative mediator).

## **6. Results**

Descriptive statistics for all measures are summarized in Table 1 and Table 2. All measures in the three complex span tasks had a distribution close of normal, with no indication of ceiling effects in gifted children. Variances were comparable across groups for all measures and Cook's distance did not reveal any outliers in the following analyses.



**Table 1. Descriptive statistics for all measures collected in the working memory task as a function of group.**

| Type of measure  | Subtest                            | Gifted ( <i>n</i> = 55) |           |       |          | Nongifted ( <i>n</i> = 55) |           |       |          |
|--|------------------------------------|-------------------------|-----------|-------|----------|----------------------------|-----------|-------|----------|
|  |                                    | <i>M</i>                | <i>SD</i> | skew  | kurtosis | <i>M</i>                   | <i>SD</i> | skew  | kurtosis |
| Recall scores  | Reading span                       | 26.18                   | 5.15      | -0.50 | 0.53     | 21.39                      | 5.98      | -0.74 | 2.51     |
|  | Symmetry span                      | 19.64                   | 4.42      | -0.05 | -0.64    | 17.20                      | 4.06      | 0.14  | -0.64    |
|  | Operation span                     | 26.27                   | 4.43      | -0.54 | 0.50     | 22.52                      | 4.46      | -0.47 | 0.63     |
|  | Composite score                    | 0.34                    | 0.67      | -0.42 | 0.18     | -0.38                      | 0.71      | -0.21 | -0.78    |
| Accuracy on concurrent processing tasks (in % correct)           | Reading span                       | 0.95                    | 0.04      | -0.74 | -0.10    | 0.94                       | 0.04      | -0.22 | -0.57    |
|  | Symmetry span                      | 0.98                    | 0.03      | -1.65 | 1.82     | 0.97                       | 0.04      | -0.74 | -0.82    |
|  | Operation span                     | 0.98                    | 0.03      | -1.33 | 1.29     | 0.96                       | 0.03      | -0.35 | -0.90    |
|  | Average accuracy <sup>1</sup>      | 0.15                    | 0.51      | -0.12 | -0.82    | -0.16                      | 0.71      | -0.37 | 0.34     |
| Median response time on concurrent processing tasks (in seconds) | Reading span                       | 2.57                    | 0.65      | 1.23  | 1.75     | 2.90                       | 0.65      | 0.64  | 0.05     |
|  | Symmetry span                      | 2.03                    | 0.52      | 0.60  | -0.62    | 2.13                       | 0.47      | 0.49  | -0.34    |
|  | Operation span                     | 2.10                    | 0.48      | 0.24  | -0.67    | 2.24                       | 0.52      | 0.70  | 0.63     |
|  | Average response time <sup>1</sup> | -0.15                   | 0.82      | 0.77  | 0.53     | 0.19                       | 0.77      | 0.45  | 0.16     |

**Table 2. Descriptive statistics for all measures collected in the ANT as a function of group.**

| Attentional Measure          | Gifted ( <i>n</i> = 55) |           |       |          | Nongifted ( <i>n</i> = 55) |           |      |          |
|------------------------------|-------------------------|-----------|-------|----------|----------------------------|-----------|------|----------|
|                              | <i>M</i>                | <i>SD</i> | skew  | kurtosis | <i>M</i>                   | <i>SD</i> | skew | kurtosis |
| <b>Overall</b>               |                         |           |       |          |                            |           |      |          |
| RT (ms)                      | 639.77                  | 97.15     | 0.91  | 1.35     | 638.14                     | 77.69     | 0.14 | -0.30    |
| Error Rate                   | 2.55                    | 1.92      | 1.56  | 3.46     | 3.92                       | 2.22      | 0.49 | -0.55    |
| <b>Networks <sup>1</sup></b> |                         |           |       |          |                            |           |      |          |
| Alerting                     | 26.49                   | 44.77     | -0.01 | -0.15    | 38.46                      | 34.50     | 0.03 | 1.15     |
| Orienting                    | 53.99                   | 32.50     | -0.07 | 3.10     | 52.91                      | 43.20     | 0.18 | -0.01    |
| Executive control            | 115.56                  | 46.27     | -0.01 | -0.26    | 158.90                     | 38.95     | 0.18 | -0.74    |

<sup>1</sup> The attentional network score was calculated based on the LISAS (Vandierendonck, 2017, 2018). Lower LISAS represents better performance at the considered network.

## 6.1. Comparison between Gifted and Nongifted Children

### 6.1.1. Working memory capacity

Working memory scores for all children in the two groups are displayed in Figure 2. An one-way ANOVA with groups (gifted vs. nongifted) as a factor indicated that intellectually gifted children had significantly higher working memory capacity than nongifted children,  $F(1, 108) = 29.821$ ,  $MSE = 0.479$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .216$ . The advantage of gifted children was equivalent for the three working memory subtests (see Table 1). 82% of gifted children were above the average of WMC in nongifted children (see Figure 2).

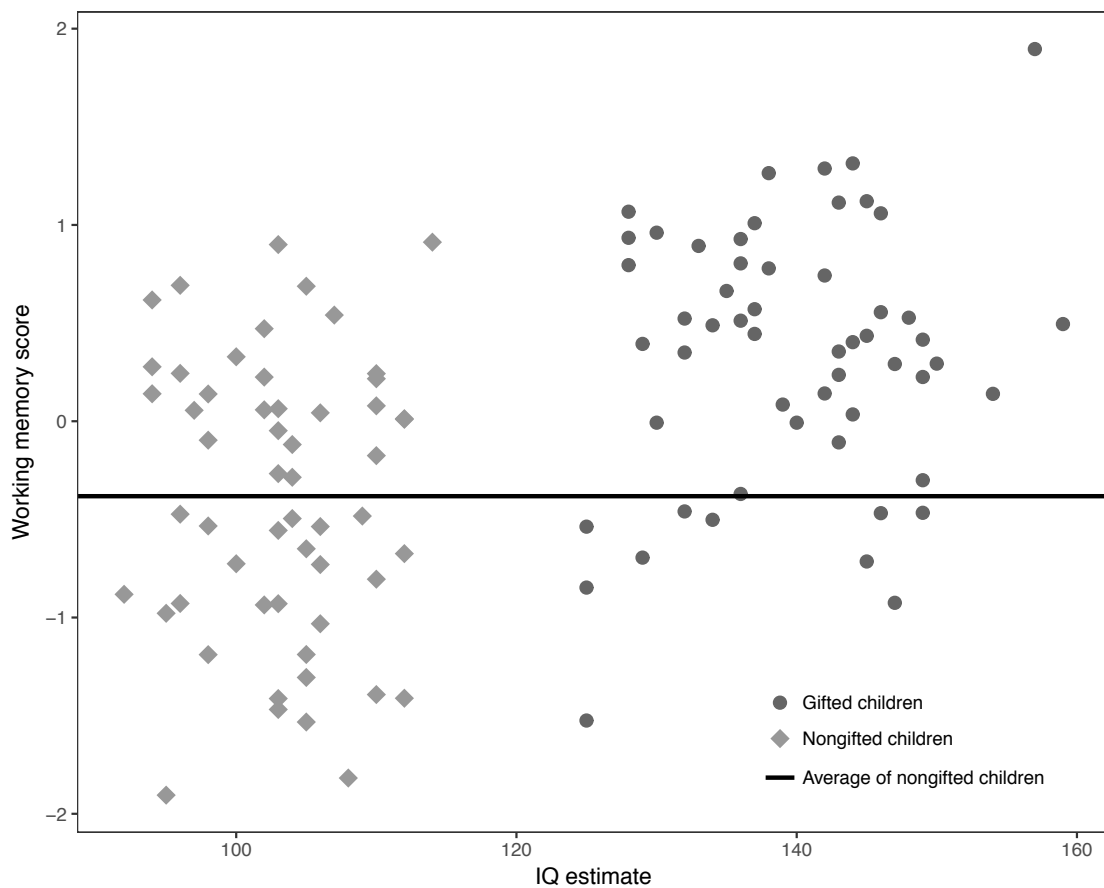


Figure 2. Working memory scores for gifted and typical children.

### 6.1.2. Performance on processing problems

An one-way ANOVA with group (gifted vs. nongifted) was performed for response times on the processing problems of the ACCES. The main effect of group was significant, indicating that gifted children were overall faster when solving problems in the complex span tasks,  $F(1, 108) = 5.12$ ,  $MSE = 0.63$ ,  $p = .025$ ,  $\eta^2 = 0.05$ .

Likewise, an one-way ANOVA with group (gifted vs. nongifted) was performed for accuracy on the processing problems of the ACCES. The main effect of group was significant, indicating that gifted children were overall more accurate when solving problems in the complex span tasks,  $F(1, 108) = 6.83$ ,  $MSE = 0.39$ ,  $p = .010$ ,  $\eta^2 = 0.06$ .

### **6.1.3. Attentional capacity**

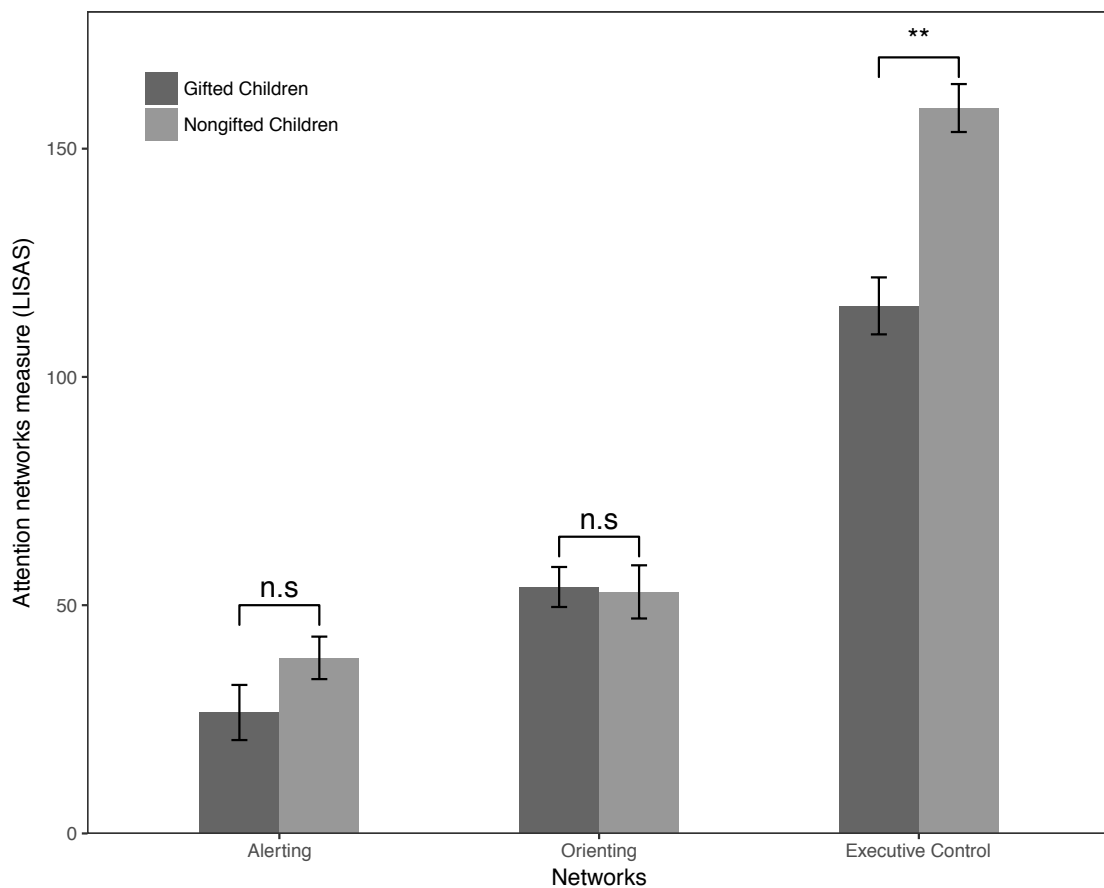
#### **6.1.3.1. Overall attentional measures**

An one-way ANOVA with groups (gifted vs. nongifted) performed on the overall of the response time and the proportion of errors in all conditions from the ANT. There was no main effect of group on the overall of the response time,  $F(1, 108) = 0.01$ ,  $MSE = 7736.77$ ,  $p = .923$ ,  $\eta^2 < 0.01$ , but gifted children did significantly fewer errors than nongifted children (see Table 2),  $F(1, 108) = 4.79$ ,  $MSE = 9.39$ ,  $p = .031$ ,  $\eta^2 = 0.04$ .

#### **6.1.3.2. Attentional networks scores**

We expected gifted children to demonstrate significantly better executive attention performance, but not necessarily better alerting or orienting. This hypothesis was tested with one-way ANOVAs with groups (gifted vs. nongifted) as factor, separately for response times and accuracy. For response times, gifted children were significantly faster in terms of executive attention (see Table 2), as predicted,  $F(1, 108) = 28.24$ ,

MSE = 1829.14,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = 0.21$ . Gifted and nongifted children did not differ significantly in terms of alerting,  $F(1, 108) = 2.47$ , MSE = 1597.51,  $p = .119$ ,  $\eta^2 = 0.02$ , or orienting,  $F(1, 108) = 0.02$ , MSE = 1461.14,  $p = .883$ ,  $\eta^2 < 0.01$ . These results are displayed in Figure 3.



**Figure 4. Attentional network scores (based on the LISAS) for gifted and nongifted children. Error bars represent standard errors of the mean. \*\*  $p < .01$**

## 6.2. Determinants of High WMC in Intellectually Gifted Children

In the previous series of analyses, we showed that gifted children not only demonstrated higher working memory capacity; they were also more proficient in their solving of concurrent processing problems in the working memory tasks, and demonstrated better executive attention, as suggested by the literature. In order to investigate the possible source of the higher working memory capacity of gifted

children, the final series of analyses investigated all these potential mediators of group differences. The child's group (intellectually gifted vs. nongifted) was treated as the predictor variable and their composite working memory score as the outcome variable. Performance on processing problems (accuracy and response times), averaged across the three subtests, and executive attention (based on the LISAS) were included as mediators.

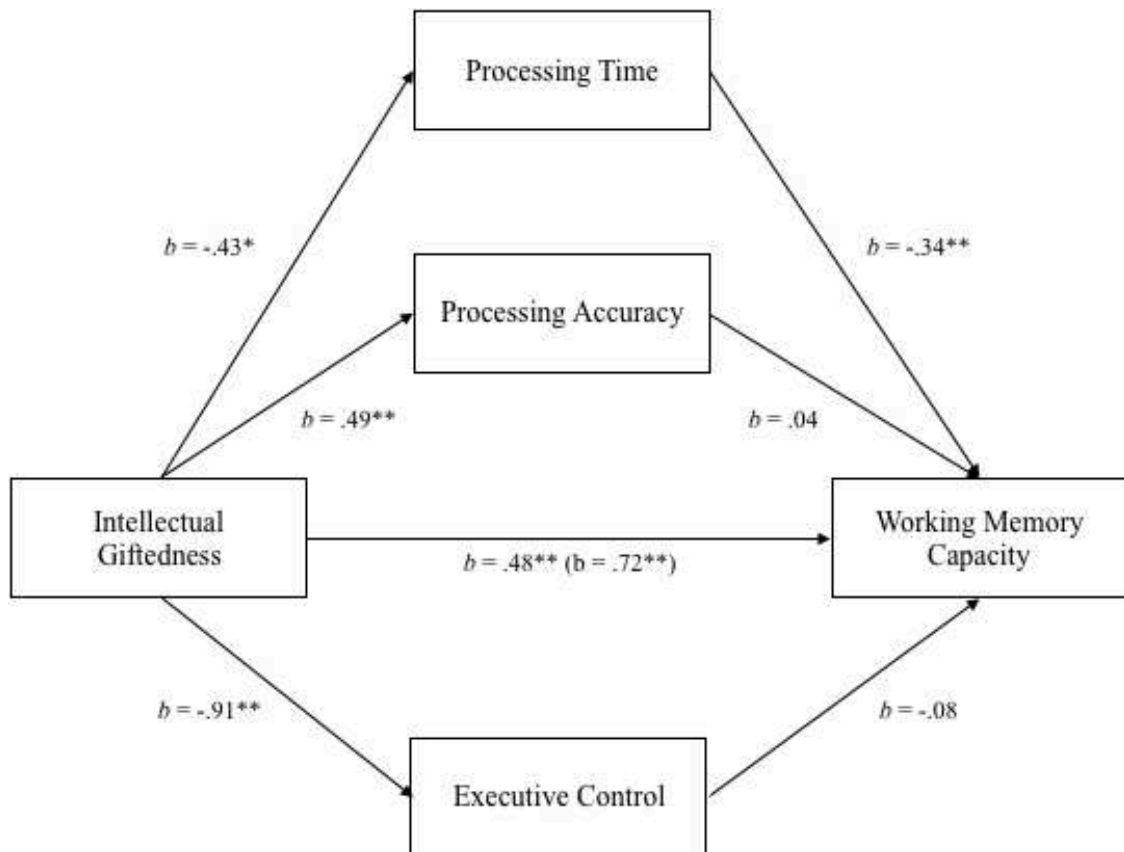
Overall, working memory capacity was negatively correlated with response times on concurrent processing tasks and positively correlated with the executive control network performance (see Table 3). The indirect effect of group on working memory capacity through the mediators was highly significant (total indirect effect = 0.720, standard error = 0.131, 95% CI [.460, .972]), confirming that group-related differences in working memory capacity were mediated by the selected measures. The direct effect of group on working memory capacity was still significant when controlling for the mediators (direct effect = 0.483, standard error = 0.133, 95% CI [.216, .737]), indicating that the mediators did not account for the full extent of working memory differences between groups (see Figure 4).

**Table 3. Bivariate correlations between working memory capacity and possible mediators as a function of group**

| <b>Measure</b>   | <b>Gifted children<br/>(<i>n</i> = 55)</b> | <b>Nongifted children<br/>(<i>n</i> = 55)</b> | <b>Whole sample<br/>(<i>N</i> = 110)</b> |
|--|--|---|--|
| <b>Performance on concurrent processing tasks: accuracy</b>      | -.05                                       | .21   | <b>.20</b>                               |
| <b>Performance on concurrent processing tasks: response time</b> | <b>-.45</b>                                | <b>-.51</b>                                   | <b>-.52</b>                              |
| <b>Executive control</b>   | -.09                                       | -.18  | <b>-.31</b>                              |

*Note.* Significant correlations are in bold.

Contrary to our hypotheses, executive attention did not mediate group-related differences in working memory capacity (indirect effect = 0.076, standard error = 0.059, 95% CI [-.025, .207]). Instead, the higher working memory capacity of gifted children was partly mediated by their higher efficiency on concurrent problems in the working memory tasks in terms of faster response times (indirect effect = 0.143, standard error = 0.070, 95% CI [.021, .294]), but not in terms of accuracy (indirect effect = 0.018, standard error = 0.033, 95% CI [-.054, .082]).



**Figure 4. Mediation model showing the association of working memory capacity and intellectual giftedness (gifted vs. nongifted) with the mediating variables (i.e. response time and accuracy in the concurrent processing, executive control network performance). \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$**

## 7. Discussion

Intellectually gifted children are thought to possess higher working memory capacity than nongifted children. Based on a domain-general battery of complex span tasks, in line with best practices from the field of working memory research, our findings confirmed that this is indeed the case. These results replicated prior findings about superior working memory performance in intellectual giftedness (Calero et al., 2007; Hoard et al., 2008; Leikin et al., 2013; van Viersen et al., 2014).

This working memory advantage is important in modern conceptions of intellectual giftedness (Kornmann et al., 2015). However, it is often difficult to measure the working memory in extremes groups such as intellectually gifted children. Experimental studies of working memory based on classic tasks tend to encounter issues (Vock & Holling, 2008). The use of an adaptive working memory task avoided such a ceiling effect in the present results. Anecdotally, at the end of the testing session, children from both groups indicated that the task was moderately difficult in their subjective reports. The use of a domain-general task also confirmed that the higher working memory capacity of gifted children is not restricted to the verbal domain, which is the domain mostly assessed by classic measures.

More generally, these results are in line with the well-documented relationship between intellectual abilities and working memory capacity (e.g. Ackerman, Beier, & Boyle, 2005; Conway, Cowan, Bunting, Therriault, & Minkoff, 2002). In other words, the data suggested that the higher intelligence of gifted children was directly related to their high working memory capacity. Overall, these results are compatible with the idea that working memory capacity is strongly related to intellectual functioning. Indeed, 82% intellectually gifted children of our sample had a WMC superior at the

average of nongifted children. The aim of this current study was to explore the potential determinants of their working memory advantage such as executive attention.

Gifted children did globally fewer errors than nongifted children, but both groups had similar global time responses. In local processing level, only the efficiency of executive attention seemed to distinguish both groups: intellectually gifted children were similar in terms of alerting and orienting, but they had higher executive control network performance than their counterparts. However, executive attention did not mediate the higher performance of these children in working memory tasks. Thus, we showed a co-occurrence between an efficient executive attention system and a high working memory span in intellectually gifted children. This conclusion is directly opposite to the prediction we had made for the study, and unexpected given previous studies showing a strong relationship between executive attention and WMC (Heitz & Engle, 2007; Redick & Engle, 2006; Shipstead, Harrison, & Engle, 2012; Unsworth & Spillers, 2010). On the other hand, not all previous studies have found this relationship (Friedman & Miyake, 2004; Liefoghe, Barrouillet, Vandierendonck, & Camos, 2008), and executive attention is not the sole determinant of WMC performance (Bailey, Dunlosky & Kane, 2011; Dunlosky & Kane, 2007). Our findings reinforce the idea that executive attention is not always a primary driver of individual differences in working memory.

Among the potential investigated determinants of WMC, only response time in the concurrent processing partially mediate the higher performance of intellectually gifted children in the working memory task. Our results shown than gifted children performed better and faster the problems in the concurrent processing from the working memory task. In other words, gifted children responded quickly to problems



in the interference phase of the working memory task without neglecting accuracy. Thus, time processing mediates partially the relationship between WMC and intelligence (Fry & Hale, 1996; Unsworth, Redick, Heitz, Broadway, & Engle, 2009). Based on the present data, time processing in the interference phase seems to be involved in the increase of the recall score (Maehara & Saito, 2007; Towse, Hitch, & Hutton, 1998). The speed of gifted children in the concurrent processing allows them to refresh their memory traces faster, increasing their performance in working memory (Vergauwe, Camos, & Barrouillet, 2014). However, our findings cannot know us the nature of this refreshing of memory traces. Indeed, the maintain of information can be explained by the nonattentional processes as effective strategies used (Bailey, Dunlosky, & Kane, 2011; Coyle, Read, Gaultney, & Bjorklund, 1998; Harnishfeger & Bjorklund, 1994) and / or a high rehearsal rate of to-be-remembered items (Fry & Hale, 2000). These factors could explain the advantage of WMC in gifted children (Engle, Tuholski, Laughlin, & Conway, 1999). One of possible interpretations might be gifted children solve problems rapidly in interference phase to release more time to rehearse the to-be-remembered items. They used not necessarily the strategies more effective than nongifted children (Gaultney, Bjorklund, & Goldstein, 1996; Harnishfeger & Bjorklund, 1994). They are more flexible and stable in strategy use than counterparts (Coyle, Read, Gaultney, & Bjorklund, 1998). In other words, they would adapt the mnemonic strategy according to the effortful of the situation. They would keep the mnemonic strategy known as effective as soon as the first trials (Gaultney et al., 1996). So, their high WMC can be in relation to expend less mental effort to achieve the same cognitive processing as nongifted children in the working memory task.

## **8. Limitation of our study**

Our study was mainly focused on one of several profile of giftedness (see Castejón, Gilar, Miñano, & González, 2016 for details). Indeed, some type of giftedness can have some specific characteristic about the working memory tasks (Benbow & Minor, 1990; Dark & Benbow, 1994). Moreover, some intellectually gifted children can be underachieving. These children demonstrate a large discrepancy between their high intellectual potential and their academic achievements (Reis & McCoach, 2000). In our sample, all intellectually gifted children were already identified, partly due to having the very good school grades. So, our findings are limited to intellectually gifted children with no academic difficulties.

The ANT has the advantage of being a quick assessment of attentional networks performance. This task uses stimuli (i.e. flankers and cues) which need low-cost cognitive processing. However, our version of ANT has some limitations (Casteljas et al., 2003; Ishigami, & Klein, 2010). The alerting and orienting networks performance were both estimated by cue condition (i.e. no and double cue for alerting; center and spatial cues for orienting). The condition specifically dedicated at the estimation of the alerting and orienting networks performance could improve the measure of each attentional networks (Ishigami, & Klein, 2010). In addition, the ANT was often perceived as long and boring by the children (Ishigami & Klein, 2015). Although we had few omission errors, this boring aspect of this task can have an impact on children's motivation and on the accuracy of attentional measures.

## 9. Conclusion

Intellectually gifted children are usually identified with a standardized intellectual test. The intellectual capacities are known to strongly linked with working memory capacity (Ackerman et al., 2005). However, the relationship between different cognitive aptitudes is weaker in high IQ children (Rowe et al., 2014) probably in relation to the Spearman's Law of Diminishing Return (Blum & Holling, 2017). Otherwise, gifted children have an atypical cognitive development viewed as asynchronous development (Corbin, Borel, & Camos, 2013; Delisle, 1990). In other words, intellectually gifted children are not advanced in the same way across all cognitive domains. The aim of this current study is to investigate this relationship between the working memory capacity and intellectual giftedness. In our sample, our findings showed the working memory capacity is important for the intellectual giftedness. However, working memory assessment cannot be viewed directly as a tool for the identification of intellectual giftedness, but it can be used to extend classic intellectual scales such as the WISC. Our results suggest that high working memory capacity is relatively common among gifted children. Assessing cognitive features related to intelligence, beyond IQ itself, also has the advantage of offering a better and more complete understanding of the cognitive profile of each child and its specificities (Acar, Sen, & Cayirdag, 2016, Cao, Jung, & Lee, 2017), paving the way for better individual support.

The aim of the current study is the investigation of the determinants of working memory in intellectually gifted children. Surprisingly, their high working memory seems not to be mediated by their high executive control performance, but only to their faster processing on the interference phase in the working memory task. This result

indicates the nonattentional processes would be involve in their high WMC. Future studies may investigate the factors in relation to the refreshment of maintained informations in working memory such as metacognitive knowledge or strategy use.

#### **10. Disclosure statement**

No conflict of interest was reported by the authors.

#### **11. Funding**

This research was supported by the Regional Council of Hauts de France and the European Regional Development Fund (ERDF).

#### **12. Acknowledgements**

The authors also thank the children who participated in the study and their families, as well as the elementary and middle schools which authorized the study. The authors heartily thank Florence Pâris, Barbara Martin, Jean-Pierre Carron and the Académie de Versailles for their precious help to realize this study.

### 13.References

- Acar, S., Sen, S., & Cayirdag, N. (2016). Consistency of the Performance and Nonperformance Methods in Gifted Identification. *Gifted Child Quarterly*, 60(2), 81–101. doi:10.1177/0016986216634438
- Ackerman, P. L., Beier, M. E., & Boyle, M. O. (2005). Working Memory and Intelligence: The Same or Different Constructs? *Psychological Bulletin*, 131(1), 30–60. doi:10.1037/0033-2909.131.1.30
- Alloway, T. P., & Elsworth, M. (2012). An investigation of cognitive skills and behavior in high ability students. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 891–895. doi:10.1016/j.lindif.2012.02.001
- Assouline, S. G., Foley Nicpon, M., & Whiteman, C. (2009). Cognitive and Psychosocial Characteristics of Gifted Students With Written Language Disability. *Gifted Child Quarterly*, 54(2), 102–115. doi: 10.1177/0016986209355974
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423. doi:10.1016/S1364-6613(00)01538-2
- Bailey, H., Dunlosky, J., & Kane, M. J. (2011). Contribution of strategy use to performance on complex and simple span tasks. *Memory & Cognition*, 39(3), 447–461. doi:10.3758/s13421-010-0034-3
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time Constraints and Resource Sharing in Adults' Working Memory Spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 83–100. doi:10.1037/0096-3445.133.1.83
- Benbow, C. P., & Minor, L. L. (1990). Cognitive Profiles of Verbally and Mathematically Precocious Students: Implications for Identification of the Gifted. *Gifted Child Quarterly*, 34(1), 21–26. doi:10.1177/001698629003400105
- Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Effect of variance ratio on ANOVA robustness: Might 1.5 be the limit? *Behavior Research Methods*, 19(59), 1–26. doi:10.3758/s13428-017-0918-2
- Callejas, A., Lupiáñez, J., Funes, M. J., & Tudela, P. (2005). Modulations among the alerting, orienting and executive control networks. *Experimental Brain Research*, 167(1), 27–37. doi:10.1007/s00221-005-2365-z
- Cao, T. H., Jung, J. Y., & Lee, J. (2017). Assessment in Gifted Education: A Review of the Literature From 2005 to 2016. *Journal of Advanced Academics*, 28(3), 163–203. doi:10.1177/1932202X17714572
- Castejón, J. L., Gilar, R., Miñano, P., & González, M. (2016). Latent class cluster analysis in exploring different profiles of gifted and talented students. *Learning and Individual Differences*, 50(C), 166–174. doi:10.1016/j.lindif.2016.08.003
- Conway, A. R. A., Cowan, N., Bunting, M. F., Theriault, D. J., & Minkoff, S. R. B. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30(2), 163–183. doi:10.1016/S0160-2896(01)00096-4
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and

- user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(5), 769–786. doi:10.3758/BF03196772
- Corbin, L., Borel, D., & Camos, V. (2013). Dissociation mémoire de travail-vitesse de traitement chez les enfants intellectuellement précoces au travers de deux études de cas [Dissociation between working memory and processing speed in gifted children through two case studies]. *Enfance*, 2012(04), 373–387. doi:10.4074/S0013754512004028
- Coyle, T. R., Read, L. E., Gaultney, J. F., & Bjorklund, D. F. (1998). Giftedness and variability in strategic processing on a multitrial memory task: Evidence for stability in gifted cognition. *Learning and Individual Differences*, 10(4), 273–290. doi:10.1016/S1041-6080(99)80123-X
- Cowan, N. (2013). Working Memory Underpins Cognitive Development, Learning, and Education. *Educational Psychology Review*, 26(2), 197–223. doi:10.1007/s10648-013-9246-y
- Cowan, N., Elliott, E. M., Scott Saults, J., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. A. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51(1), 42–100. doi:10.1016/j.cogpsych.2004.12.001
- Dark, V. J., & Benbow, C. P. (1994). Type of stimulus mediates the relationship between working-memory performance and type of precocity. *Intelligence*, 19(3), 337–357. doi:10.1016/0160-2896(94)90006-X
- Delisle, J. R. (1990). The Gifted Adolescent at Risk: Strategies and Resources for Suicide Prevention among Gifted Youth. *Journal for the Education of the Gifted*, 13(3), 212–228. doi:10.1177/016235329001300303
- Dixon, F. A., Cross, T. L., & Adams, C. M. (2001). Psychological characteristics of academically gifted students in a residential setting: A cluster analysis. *Psychology in the Schools*, 38(5), 433–445. doi:10.1002/pits.1032
- Draheim, C., Hicks, K. L., & Engle, R. W. (2016). Combining Reaction Time and Accuracy. *Perspectives on Psychological Science*, 11(1), 133–155. doi:10.1177/1745691615596990
- Duan, X., Dan, Z., & Shi, J. (2013). The Speed of Information Processing of 9- to 13-Year-Old Intellectually Gifted Children. *Psychological Reports*, 112(1), 20–32. doi:10.2466/04.10.49.PR0.112.1.20-32
- Duan, X., Shi, J., Wu, J., Mou, Y., Cui, H., & Wang, G. (2009). Electrophysiological correlates for response inhibition in intellectually gifted children: A Go/NoGo study. *Neuroscience Letters*, 457(1), 45–48. doi:10.1016/j.neulet.2009.04.006
- Dunlosky, J., & Kane, M. J. (2007). The Contributions of Strategy Use to Working Memory Span: A Comparison of Strategy Assessment Methods. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(9), 1227–1245. doi:10.1080/17470210600926075
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128(3), 309–331. doi:10.1037/0096-3445.128.3.309

- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the Efficiency and Independence of Attentional Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(3), 340–347. doi:10.1162/089892902317361886
- Foster, J. L., Shipstead, Z., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2014). Shortened complex span tasks can reliably measure working memory capacity. *Memory & Cognition, 43*(2), 226–236. doi:10.3758/s13421-014-0461-7
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The Relations Among Inhibition and Interference Control Functions: A Latent-Variable Analysis. *Journal of Experimental Psychology: General, 133*(1), 101–135. doi:10.1037/0096-3445.133.1.101
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The Structure of Working Memory From 4 to 15 Years of Age. *Developmental Psychology, 40*(2), 177–190. doi:10.1037/0012-1649.40.2.177
- Gaultney, J. F., Bjorklund, D. F., & Goldstein, D. (1996). To Be Young, Gifted, and Strategic: Advantages for Memory Performance. *Journal of Experimental Child Psychology, 61*(1), 43–66. doi:10.1006/jecp.1996.0002
- Giofrè, D., Mammarella, I. C., & Cornoldi, C. (2013). The structure of working memory and how it relates to intelligence in children. *Intelligence, 41*(5), 396–406. doi:10.1016/j.intell.2013.06.006
- Gonthier, C., Aubry, A., & Bourdin, B. (2017). Measuring working memory capacity in children using adaptive tasks: Example validation of an adaptive complex span. *Behavior Research Methods, 27*(8), 1–12. doi:10.3758/s13428-017-0916-4
- Gonthier, C., Thomassin, N., & Roulin, J.-L. (2015). The composite complex span: French validation of a short working memory task. *Behavior Research Methods, 48*(1), 233–242. doi:10.3758/s13428-015-0566-3
- Guez, A., Panaïotis, T., Peyre, H., & Ramus, F. (2018). Predictors of the IQ-achievement gap in France: A longitudinal analysis. *Intelligence, 69*, 104–116. doi:10.1016/j.intell.2018.05.008
- Heitz, R. P., & Engle, R. W. (2007). Focusing the spotlight: Individual differences in visual attention control. *Journal of Experimental Psychology: General, 136*(2), 217–240. doi:10.1037/0096-3445.136.2.217
- Hoard, M. K., Geary, D. C., Byrd-Craven, J., & Nugent, L. (2008). Mathematical Cognition in Intellectually Precocious First Graders. *Developmental Neuropsychology, 33*(3), 251–276. doi:10.1080/87565640801982338
- Hughes, M. M., Linck, J. A., Bowles, A. R., Koeth, J. T., & Bunting, M. F. (2013). Alternatives to switch-cost scoring in the task-switching paradigm: Their reliability and increased validity. *Behavior Research Methods, 46*(3), 702–721. doi:10.3758/s13428-013-0411-5
- Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2010). Repeated measurement of the components of attention using two versions of the Attention Network Test (ANT): Stability, isolability, robustness, and reliability. *Journal of Neuroscience Methods, 190*(1), 117–128. doi:10.1016/j.jneumeth.2010.04.019
- Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2015). Repeated Measurement of the Components of Attention With Young Children Using the Attention Network Test: Stability, Isolability, Robustness, and Reliability. *Journal of Cognition and Development, 16*(1), 144–159. doi:10.1080/15248372.2013.803971

- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working-memory capacity and the control of attention: The contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, *132*(1), 47–70. doi:10.1037/0096-3445.132.1.47
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W., & Engle, R. W. (2004). The Generality of Working Memory Capacity: A Latent-Variable Approach to Verbal and Visuospatial Memory Span and Reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*(2), 189–217. doi: 10.1037/0096-3445.133.2.189
- Kornmann, J., Zettler, I., Kammerer, Y., Gerjets, P., & Trautwein, U. (2015). What characterizes children nominated as gifted by teachers? A closer consideration of working memory and intelligence. *High Ability Studies*, *26*(1), 75–92. doi: 10.1080/13598139.2015.1033513
- Krumm, S., Ziegler, M., & Buehner, M. (2008). Reasoning and working memory as predictors of school grades. *Learning and Individual Differences*, *18*(2), 248–257. doi:10.1016/j.lindif.2007.08.002
- Leikin, M., Paz-Baruch, N., & Leikin, R. (2013). Memory abilities in generally gifted and excelling-in-mathematics adolescents. *Intelligence*, *41*(5), 566–578. doi: 10.1016/j.intell.2013.07.018
- Liefooghe, B., Barrouillet, P., Vandierendonck, A., & Camos, V. (2008). Working memory costs of task switching. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*(3), 478–494. doi:10.1037/0278-7393.34.3.478
- Liu, T., Xiao, T., Shi, J., & Zhao, D. (2011a). Response preparation and cognitive control of highly intelligent children: a Go-Nogo event-related potential study. *Neuroscience*, *180*(C), 122–128. doi:j.neuroscience.2011.02.022
- Liu, T., Xiao, T., Shi, J., & Zhao, L. (2011b). Sensory gating, inhibition control and child intelligence: an event-related potentials study. *Neuroscience*, *189*(C), 250–257. doi:10.1016/j.neuroscience.2011.05.009
- Logie, R. H. (2011). The Functional Organization and Capacity Limits of Working Memory. *Current Directions in Psychological Science*, *20*(4), 240–245. doi: 10.1177/0963721411415340
- Maehara, Y., & Saito, S. (2007). The relationship between processing and storage in working memory span: Not two sides of the same coin. *Journal of Memory and Language*, *56*(2), 212–228. doi:10.1016/j.jml.2006.07.009
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A., & 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. doi:10.1037/a0017619
- McClain, M.-C., & Pfeiffer, S. (2012). Identification of Gifted Students in the United States Today: A Look at State Definitions, Policies, and Practices. *Journal of Applied School Psychology*, *28*(1), 59–88. doi:10.1080/15377903.2012.643757
- McIntosh, D. E., Dixon, F. A., & Pierson, E. E. (2012). *Use of Intelligence Tests in the Identification of Giftedness*. In D. P. Flanagan & P. L. Harrison (Eds.), *Contemporary Intellectual Assessment Theories, Tests, and Issues* (pp. 623–642). New York, NY.



- MacLeod, J. W., Lawrence, M. A., McConnell, M. M., Eskes, G. A., Klein, R. M., & Shore, D. I. (2010). Appraising the ANT: Psychometric and theoretical considerations of the Attention Network Test. *Neuropsychology, 24*(5), 637–651. doi:10.1037/a0019803
- Maddocks, D. L. S. (2018). The Identification of Students Who Are Gifted and Have a Learning Disability: A Comparison of Different Diagnostic Criteria. *Gifted Child Quarterly, 62*(2), 175–192. doi:10.1177/0016986217752096
- Nagelkerke, N. J. D. (1991). A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination. *Biometrika, 78*(3), 691–3. doi:10.2307/2337038
- Nouwens, S., Groen, M. A., & Verhoeven, L. (2016). How working memory relates to children's reading comprehension: the importance of domain-specificity in storage and processing. *Reading and Writing, 30*(1), 105–120. doi:10.1007/s11145-016-9665-5
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual Review of Neuroscience, 35*(1), 73–89. doi:10.1146/annurev-neuro-062111-150525
- Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2004). SPSS and SAS procedures for estimating indirect effects in simple mediation models. *Behavior Research Methods, 36*(4), 717–731. doi:10.3758/BF03206553
- Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2008). Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models. *Behavior Research Methods, 40*(3), 879–891. doi:10.3758/BRM.40.3.879
- Raghubar, K. P., Barnes, M. A., & Hecht, S. A. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences, 20*(2), 110–122. doi:10.1016/j.lindif.2009.10.005
- Raven, J., Raven, J. C. & Court, J. H. (1998). Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 3, The Standard Progressive Matrices. Oxford, England: Oxford Psychologists Press/San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Redick, T. S., Broadway, J. M., Meier, M. E., Kuriakose, P. S., Unsworth, N., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2012). Measuring Working Memory Capacity With Automated Complex Span Tasks. *European Journal of Psychological Assessment, 28*(3), 164–171. doi:10.1027/1015-5759/a000123
- Redick, T. S., & Engle, R. W. (2006). Working memory capacity and attention network test performance. *Applied Cognitive Psychology, 20*(5), 713–721. doi:10.1002/acp.1224
- Reynolds, M. R. (2013). Interpreting the g loadings of intelligence test composite scores in light of Spearman's law of diminishing returns. *School Psychology Quarterly, 28*(1), 63–76. doi:10.1037/spq0000013
- Roberts, K. L., Strait, J. A. E., & Decker, S. L. (2018). Developmental Trajectories of Verbal, Static Visual-Spatial, and Dynamic Visual-Spatial Working Memory. *Contemporary School Psychology, 106*(1), 1–10. doi:10.1007/s40688-018-0176-z
- Rosseel, Y. (2012). lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software, 48*(2), 1–36. doi:10.18637/jss.v048.i02

- 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. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012
- Schweizer, K., Moosbrugger, H., & Goldhammer, F. (2005). The structure of the relationship between attention and intelligence. *Intelligence*, *33*(6), 589–611. doi:10.1016/j.intell.2005.07.001
- Seigneuric, A., & Ehrlich, M.-F. (2005). Contribution of Working Memory Capacity to Children's Reading Comprehension: A Longitudinal Investigation. *Reading and Writing*, *18*(7-9), 617–656. doi:10.1007/s11145-005-2038-0
- Shipstead, Z., Harrison, T. L., & Engle, R. W. (2012). Working Memory Capacity and Visual Attention: Top-Down and Bottom-Up Guidance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*(3), 401–407. doi:10.1080/17470218.2012.655698
- Steiner, H. H., & Carr, M. (2003). Cognitive Development in Gifted Children: Toward a More Precise Understanding of Emerging Differences in Intelligence. *Educational Psychology Review*, *15*(3), 215–246. doi:10.1023/A:1024636317011
- Terman, L. M., & Oden, M. H. (1947). *The gifted child grows up: twenty-five years' follow-up of a superior group*. Palo Alto, CA, US: Stanford Univ. Press.
- Thaler, N. S., Goldstein, G., Pettegrew, J. W., Luther, J. F., Reynolds, C. R., & Allen, D. N. (2013). Developmental Aspects of Working and Associative Memory. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *28*(4), 348–355. doi:10.1093/arclin/acs114
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (1998). A Reevaluation of Working Memory Capacity in Children. *Journal of Memory and Language*, *39*(2), 195–217. doi:10.1006/jmla.1998.2574
- Unsworth, N., Redick, T. S., Heitz, R. P., Broadway, J. M., & Engle, R. W. (2009). Complex working memory span tasks and higher-order cognition: A latent-variable analysis of the relationship between processing and storage. *Memory*, *17*(6), 635–654. doi:10.1080/09658210902998047
- Unsworth, N., & Spillers, G. J. (2010). Working memory capacity: Attention control, secondary memory, or both? A direct test of the dual-component model. *Journal of Memory and Language*, *62*(4), 392–406. doi:10.1016/j.jml.2010.02.001
- Vandierendonck, A., De Vooght, G., & Van der Goten, K. (1998). Does Random Time Interval Generation Interfere with Working Memory Executive Functions? *European Journal of Cognitive Psychology*, *10*(4), 413–442. doi:10.1080/713752284
- Vergauwe, E., Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). The impact of storage on processing: How is information maintained in working memory? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *40*(4), 1072–1095. doi:10.1037/a0035779
- van Viersen, S., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Bree, E. H. (2014). High Reading Skills Mask Dyslexia in Gifted Children. *Journal of Learning Disabilities*, *49*(2), 189–199. doi:10.1177/0022219414538517
- Vock, M., & Holling, H. (2008). The measurement of visuo-spatial and verbal-numerical working memory: Development of IRT-based scales. *Intelligence*, *36*(2), 161–182. doi:10.1016/j.intell.2007.02.004

- Warne, R. T. (2015). Five Reasons to Put the gBack Into Giftedness. *Gifted Child Quarterly*, *60*(1), 3–15. doi:10.1177/0016986215605360
- Wechsler, D. (2005). Manuel de l'Échelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants-4e édition [Manual for the Wechsler Intelligence Scale for Children—fourth edition]. Paris: Éditions du Centre de Psychologie Appliquée
- Yang, H., Yang, S., & Kang, C. (2014). The relationship between phonological awareness and executive attention in Chinese-English bilingual children. *Cognitive Development*, *30*, 65–80. doi:10.1016/j.cogdev.2013.11.003

## **DISCUSSION GÉNÉRALE**

Ce travail de thèse avait pour objectif d'explorer les spécificités cognitives des enfants à haut potentiel intellectuel. Dans cette perspective, la première partie s'est intéressée au profil cognitif des enfants à haut potentiel intellectuel au test standardisé d'évaluation des capacités intellectuelles le plus utilisé, c'est-à-dire l'échelle de Wechsler (Evers et al., 2012). Parmi les différentes aptitudes cognitives, les capacités attentionnelles et de la mémoire de travail ont particulièrement retenu notre attention à cause de leurs liens privilégiés avec les capacités intellectuelles, les capacités d'apprentissage ou encore les performances scolaires. La seconde partie s'est ainsi focalisée sur les réseaux attentionnels et leur développement chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Selon la littérature, les capacités attentionnelles jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de la mémoire de travail. Cette capacité cognitive semble être une caractéristique fondamentale du haut potentiel intellectuel (Hoard et al., 2008 ; Kornmann et al., 2015 ; Vock & Holling, 2008). La troisième et dernière partie a donc exploré le fonctionnement de la mémoire de travail des enfants à haut potentiel intellectuel. La mémoire de travail semble être déterminée par certaines aptitudes cognitives jouant un rôle prépondérant dans son fonctionnement, telles que la vitesse de traitement (Fry & Hale, 2000 ; Kail, 2007 ; Wilhelm & Oberauer, 2006), et le contrôle attentionnel (Conway et al., 2002 ; Kane et al., 2004 ; Redick & Engle, 2006). Ces aptitudes cognitives ont alors été investiguées afin de mieux comprendre le fonctionnement de la capacité de la mémoire de travail des enfants à haut potentiel intellectuel. Les différentes parties de ce travail de thèse ont ainsi démontré que les enfants à haut potentiel intellectuel ont un profil cognitif particulier.

**Dans la première partie**, une étude a été réalisée afin d'élaborer des formes abrégées des récentes versions des échelles de Wechsler, c'est-à-dire le WISC-IV (Wechsler, 2005) et le WISC-V (Wechsler, 2016). Les tests classiques d'intelligence nécessitent habituellement un temps d'administration élevé, et ils ne permettent pas d'investiguer certains facteurs cognitifs et motivationnels pouvant être des caractéristiques essentielles à cette population. Ces formes abrégées seraient des outils utiles pour une identification rapide et efficace des enfants à haut potentiel intellectuel. Les résultats de cette première étude ont confirmé que les aptitudes de raisonnement fluide (Gf), de compréhension-connaissance (Gc) et de traitement visuel (Gv) fournissent les meilleurs indices permettant d'identifier les enfants ayant un haut potentiel intellectuel. Ces résultats confirment que ces aptitudes cognitives représentent des caractéristiques fondamentales de ces enfants particuliers (Margulies & Floyd, 2009 ; Volker et al., 2006). En termes d'implications cliniques, les psychologues devraient donc être attentifs aux performances aux épreuves évaluant ces aptitudes cognitives (c.-à-d., Gf, Gc et Gv) fondamentalement liées au haut potentiel intellectuel. Ces aptitudes cognitives ont été identifiées à l'aide du modèle de Carroll-Horn-Cattell (CHC), considéré comme l'un des modèles les plus influents dans la conception des tests standardisés d'évaluation du potentiel intellectuel (Grégoire, 2017).

Ce travail a permis de déterminer la combinaison d'épreuves constituant les formes abrégées les plus pertinentes pour réduire le temps d'estimation du potentiel intellectuel. Cependant, il est nécessaire de préciser qu'aucune décision ne devrait être réalisée uniquement sur la base d'un score composite d'une forme abrégée. Il est nécessaire d'implémenter cette brève mesure au sein d'une évaluation multidimensionnelle des caractéristiques des enfants à haut potentiel intellectuel

(McClain & Pfeiffer, 2012). En effet, la question de l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel doit dépasser la seule mesure du QI en investiguant sur l'analyse du profil cognitif et motivationnel (Liratni & Pry, 2012 ; Warne, 2015 ; Worrell, 2009). Le fait d'avoir une performance globale élevée à des tests standardisés d'évaluation des capacités intellectuelles ne signifie pas inéluctablement des performances scolaires élevées (Guez et al., 2018). Il est nécessaire d'avoir une vision large des caractéristiques spécifiques de ces enfants particuliers afin de réaliser des interventions pédagogiques les plus adaptées (Villatte, Hugo, & de Léonardis, 2011). Dans cette perspective, les capacités attentionnelles et celles de la mémoire de travail ont alors été investiguées du fait de leurs liens privilégiés avec les capacités intellectuelles et les performances scolaires (Ackerman et al., 2005 ; Burns et al., 2009 ; Chuderski, 2013 ; Cornoldi & Giofrè, 2014 ; Cowan et al., 2006 ; Schweizer & Moosbrugger, 2004 ; Schweizer et al., 2005 ; Tillman, Bohlin, Sorensen, & Lundervold, 2009 ; Tourva et al., 2015).

**Dans la seconde partie**, les trajectoires développementales des réseaux attentionnels (c.-à-d., l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif) ont été explorées chez les enfants à haut potentiel intellectuel et comparées avec celles de leurs pairs. Les résultats de cette étude ont montré que les enfants à haut potentiel intellectuel ne se différenciaient pas au niveau du rythme développemental des réseaux attentionnels durant la fin de l'enfance jusqu'au début de l'adolescence. Parmi les 3 réseaux attentionnels, les résultats ont montré que seules les performances au contrôle exécutif permettent de discriminer les enfants à haut potentiel intellectuel de leurs pairs. Cela confirme les résultats des précédentes recherches montrant que les enfants à haut potentiel intellectuel ont une meilleure efficacité à focaliser volontairement leur

attention dans le but de résoudre des conflits simples (Calero et al., 2007 ; Duan et al., 2009 ; Johnson et al., 2003 ; Liu, Xiao, Shi, & Zhao, 2011a ; 2011b). Bien que leurs réseaux attentionnels aient le même rythme développemental que ceux de leurs congénères, les enfants à haut potentiel intellectuel présentent donc un niveau de contrôle exécutif plus avancé que les enfants au développement typique. Ce résultat soutiendrait l'hypothèse d'une hétérochronie développementale des enfants à haut potentiel intellectuel (Boschi et al., 2016 ; Corbin et al., 2013 ; Planche, 2000) au niveau du réseau du contrôle exécutif par rapport aux 2 autres réseaux attentionnels.

Le réseau du contrôle exécutif semble être une caractéristique importante des enfants à haut potentiel intellectuel. Pourtant, cette aptitude cognitive est très peu évaluée dans le cadre de l'identification du haut potentiel intellectuel. Il y aurait des implications cliniques à évaluer le contrôle exécutif. Ce réseau attentionnel est lié à l'autorégulation et au développement socioémotionnel chez les enfants au développement typique (Rothbart, Sheese, Rueda, & Posner, 2011 ; Rueda et al., 2010). Certains auteurs mettent en avant des difficultés socioémotionnelles et d'autorégulation que peuvent rencontrer certains enfants à haut potentiel intellectuel ayant des difficultés scolaires (Guérolé et al., 2015). Des études ultérieures semblent nécessaires afin d'investiguer les liens entre les capacités d'autorégulation et socioémotionnelles des enfants à haut potentiel intellectuel, ayant et n'ayant pas de difficultés scolaires.

Le contrôle exécutif joue également un rôle crucial dans le fonctionnement de la mémoire de travail, c'est-à-dire la capacité à traiter, manipuler et stocker de brèves informations au cours d'activité cognitive (Engle et al. 1999 ; Kane et al., 2001). Les

enfants à haut potentiel intellectuel ont une capacité élevée de la mémoire de travail (Calero et al., 2007 ; Hoard et al., 2008 ; Leikin et al., 2013 ; van Viersen et al., 2014).

La particularité de l'efficacité du contrôle exécutif des enfants à haut potentiel intellectuel pourrait donc être une explication de leurs performances élevées en mémoire de travail.

**Dans la troisième et dernière partie**, la mémoire de travail a été explorée afin de comprendre son fonctionnement chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Lors de la troisième étude, un outil original d'évaluation de la mémoire de travail a été présenté : l'*Adaptive Composite Complex Span* (ACCES ; Gonthier et al., 2017). Il regroupe 3 tâches d'empan complexe multimodales classiquement utilisées dans la littérature (Unsworth & Engle, 2012). Cet outil permet ainsi d'estimer le domaine général de la mémoire de travail. L'originalité d'ACCES est de réaliser une évaluation adaptative de la capacité de la mémoire de travail. En effet, la difficulté des essais ultérieurs est déterminée par la performance du participant à l'essai précédent. Les résultats de cette troisième étude ont montré l'absence d'effet plafond chez les enfants les plus âgés et les jeunes adultes, et d'effet plancher chez les enfants les plus jeunes. L'intérêt de cet outil est de l'utiliser dans le contexte du haut potentiel intellectuel. Dans la littérature, les enfants à haut potentiel intellectuel sont réputés pour atteindre rapidement les scores maximaux à ce genre d'épreuve (Vock & Holling, 2008). Cet effet plafond aurait donc des conséquences importantes dans l'investigation des différences interindividuelles dans le fonctionnement de la mémoire de travail. Par ailleurs, la mémoire de travail semble être une caractéristique importante pour les enfants à haut potentiel intellectuel. Les résultats de la quatrième et dernière étude sont en accord avec ceux de Kornmann et collaborateurs (2015) réalisés à partir d'un



échantillon d'enfants à haut potentiel identifiés par les enseignants. La mémoire de travail serait ainsi une caractéristique des enfants à haut potentiel intellectuel indépendamment de la manière dont ils sont identifiés. Il est important de prendre en compte le fonctionnement de la mémoire de travail dans les modèles théoriques du haut potentiel.

À partir d'ACCES, les déterminants de la mémoire de travail chez les enfants à haut potentiel intellectuel ont été explorés. L'objectif de cette quatrième étude était d'expliquer leurs performances élevées dans les tâches de mémoire de travail (Calero et al., 2007 ; Hoard et al., 2008 ; Leikin et al., 2013 ; van Viersen et al., 2014). De manière surprenante, la performance élevée au contrôle exécutif des enfants à haut potentiel intellectuel ne semble pas expliquer significativement la différence de performance en mémoire de travail. Ce résultat va à l'encontre de ceux de Redick et Engle (2006) qui ont mis en évidence un lien entre le contrôle exécutif et les performances en mémoire de travail chez les jeunes adultes. Ces auteurs ont comparé les réseaux attentionnels entre 2 groupes extrêmes, c'est-à-dire des jeunes adultes avec des performances très faibles et d'autres avec des performances très élevées en mémoire de travail. Ce genre de paradigme a tendance à amplifier la taille des effets expérimentaux (Preacher, Rucker, MacCallum, & Nicewander, 2005). À l'inverse de Redick et Engle (2006), les résultats de cette quatrième étude ont montré que le contrôle exécutif n'avait pas de rôle explicatif de la variabilité interindividuelle de la capacité de la mémoire de travail chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Cependant, cet aspect de l'attention serait tout de même important dans le fonctionnement de la mémoire de travail. De nombreuses études ont montré un effet de l'entraînement attentionnel sur les performances en mémoire de travail chez les enfants

atteints de troubles des apprentissages (pour des méta-analyses, voir Cortese et al., 2015 ; Rapport, Orban, Kofler, & Friedman, 2013). Cet effet est décrit comme limité à cause de la transférabilité de l'entraînement dans les activités scolaires. Cependant, ces études ont été réalisées chez les enfants n'ayant pas de haut potentiel intellectuel. La transférabilité des connaissances est tributaire des performances en raisonnement fluide (Geake, 2008). Par conséquent, il est plausible que cet effet de l'entraînement attentionnel soit plus important chez les enfants « doublement exceptionnels ». Certaines études ont montré que le niveau de performances en mémoire de travail a un impact sur la compensation des symptômes des troubles d'apprentissage chez les enfants « doublement exceptionnels » (par ex. van Viersen et al., 2014). De futures recherches pourraient donc se focaliser sur l'effet de l'entraînement du contrôle exécutif sur la mémoire de travail chez les enfants « doublement exceptionnels ».

Les résultats de cette dernière étude ont également montré que la rapidité de traitement de la phase interférente expliquait significativement la différence de performances en mémoire de travail entre les enfants à haut potentiel intellectuel et leurs pairs. Cela fait écho à la dégradation temporelle des informations stockées temporairement. Plus le temps entre 2 épisodes de mémorisation est court, meilleur est le rappel des informations mémorisées (Barrouillet et al., 2004). Il est donc plausible que la vitesse de traitement soit un facteur crucial dans l'explication de la variabilité interindividuelle en mémoire de travail (Cowan et al., 2003 ; Barrouillet et al., 2004). Cette vitesse de traitement pourrait être mise en lien avec la dégradation temporelle de l'élément mémorisé. Cet élément stocké temporairement contiendrait 2 informations distinctes (Majerus, 2008) : 1) l'item correspondant aux caractéristiques propres à l'information mémorisée (par ex. l'aspect phonologique, sémantique ou visuel) ;

2) l'ordre sériel qui est lié au positionnement séquentiel de la présentation de l'élément à mémoriser. Le traitement de ces 2 types d'informations est indépendant et joue un rôle important dans le rappel. L'information « item » équivaldrait à l'activation temporaire des informations stockées en mémoire à long terme, alors que l'information « ordre sériel » serait liée à l'aspect endogène du réseau d'orientation (Abrahamse, van Dijck, Majerus, & Fias, 2014). Les résultats de cette quatrième étude ont mis en évidence la médiatisation de la rapidité de réalisation de la tâche interférente sur la performance élevée en mémoire de travail chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Ainsi, le traitement de l'information « item » semble donc être un élément explicatif de la différence entre les enfants à haut potentiel intellectuel et les pairs. Par ailleurs, les résultats ont montré que les enfants à haut potentiel intellectuel présentaient des performances non significativement différentes de celles de leurs pairs au niveau du réseau d'orientation. Il y aurait peu de probabilité de l'intervention de l'information « ordre sériel » dans l'explication de leurs performances élevées en mémoire de travail. Il serait donc intéressant de poursuivre cette recherche sur la dégradation temporelle de l'information « item » chez les enfants à haut potentiel intellectuel.

Les participants des différentes études étaient des enfants à haut potentiel intellectuel n'ayant pas de troubles des apprentissages. Or, ces enfants peuvent être atteints de tels troubles (par ex. le trouble spécifique du langage écrit, le trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité ou encore le trouble d'acquisition de la coordination). De nombreuses études ont montré que le traitement de l'information « ordre sériel » peut être altéré dans ces troubles (Attout, Van der Kaa, George, & Majerus, 2012 ; Majerus, 2016). Il serait donc également intéressant d'investiguer le

traitement de l'information « ordre sériel » et l'aspect endogène du réseau d'orientation chez les enfants « doublements exceptionnels ».

En résumé, les enfants à haut potentiel intellectuel présentent des capacités intellectuelles, du contrôle exécutif et de la mémoire de travail élevées. Ces caractéristiques sont connues pour être protectrices d'évènements négatifs comme l'échec scolaire, la dépression, l'anxiété, etc. (Warne, 2015). Par exemple, certaines études ont montré que les performances élevées dans les tâches de mémoire de travail sont inversement liées à l'apparition de traits anxieux (Chuderski, 2014). Cependant, d'autres études ont montré que les individus ayant un niveau intellectuel élevé ne bénéficient pas de leur capacité élevée en mémoire de travail dans un contexte de stress (Beilock & Carr, 2005 ; Gimmig, Huguet, Caverni, & Cury, 2006 ; Smeding, Darnon, & Van Yperen, 2015). Ces recherches appuient sur l'importance de l'effet du contexte dans le déploiement du potentiel de l'individu, et particulièrement des enfants à haut potentiel intellectuel.

Dans cette perspective, il est nécessaire de comprendre les facteurs modulant la transformation du potentiel en talent. Ce travail de thèse s'est focalisé principalement sur certains potentiels de ces enfants particuliers qui sont fortement liés aux performances scolaires. D'autres facteurs cognitifs pourraient être investigués afin de mieux comprendre la façon dont les enfants à haut potentiel intellectuel interagissent avec leur environnement, comme la métacognition et la flexibilité mentale. Des investigations ultérieures seront nécessaires pour mettre en lien ces potentiels avec les difficultés scolaires et sociales que peuvent rencontrer certains de ces enfants. Cela

permettrait d'apporter une réflexion sur les aménagements pédagogiques et la prise en compte des caractéristiques cognitives de ces enfants à besoins éducatifs particuliers.

Des recherches ont commencé à évaluer certaines pratiques comme l'improvisation théâtrale afin de déployer la manifestation des potentiels de l'enfant, tels que la pensée divergente (Hainselin, Aubry & Bourdin, 2018). De futures recherches sont nécessaires pour créer et évaluer l'efficacité d'autres interventions pédagogiques permettant d'agir non seulement sur des aspects cognitifs, mais également sur des aspects non cognitifs comme l'estime de soi, l'anxiété, et la motivation.

## **CONCLUSION**

Le haut potentiel intellectuel est une forme particulière de haut potentiel parmi d'autres (Sternberg, 1999 ; Renzulli, 1978 ; Gagné, 1985). Les enfants à haut potentiel intellectuel sont habituellement identifiés à partir d'un QI élevé à une évaluation standardisée comme le *Wechsler Intelligence Scale for Children* (WISC-V, Wechsler, 2016). Ces enfants sont reconnus par le Ministère de l'Éducation Nationale comme des enfants ayant des besoins éducatifs particuliers (Delaubier, 2002). Ce niveau rare et peu fréquent des capacités intellectuelles cache des particularités cognitives essentielles à prendre en compte dans la mise en place d'aménagement pédagogique (Warne, 2015). L'objectif de ce travail de thèse était d'apporter une contribution aux connaissances sur le fonctionnement et le développement cognitif des enfants à haut potentiel intellectuel afin d'amener une réflexion sur l'identification de leurs spécificités cognitives.

Ce travail de thèse a montré que les enfants à haut potentiel intellectuel ont des performances élevées au niveau des aptitudes de compréhension-connaissance, de

raisonnement fluide et du traitement visuel. Ces aptitudes cognitives sont souvent utilisées pour l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel (Volker et al., 2006 ; Rowe et al., 2010). Cependant, l'évaluation avec les échelles de Wechsler est coûteuse en termes de temps de passation. Dans certaines conditions, cela peut empêcher d'approfondir l'évaluation d'autres aptitudes cognitives ou non cognitives pouvant permettre d'identifier les besoins éducatifs nécessaires pour ces enfants particuliers, tels que l'attention (par ex. Shi et al., 2013) ou la mémoire de travail (par ex. Kornmann et al., 2015) ou encore la conception de soi (par ex. Villatte, Courtinat-Camps, & de Léonardis, 2014). À partir d'une méthode de simulation statistique, la première étude a permis de sélectionner 2 formes abrégées aux WISC-IV et WISC-V pour détecter rapidement un haut potentiel intellectuel chez les enfants ou adolescents. La forme avec les épreuves *Similitudes + Matrices* et celle avec les épreuves *Similitudes + Vocabulaire + Matrices + Cubes* ont montré une fiabilité et une précision satisfaisantes pour estimer le QIT et l'IAG. Cette étude a également montré l'intérêt d'utiliser le modèle Cattell-Horn-Carroll comme une conception de la structure hiérarchique des aptitudes cognitives. Ce type de modèle permet de discriminer les capacités cognitives spécifiques des enfants à haut potentiel intellectuel. Cela a permis ainsi de sélectionner les épreuves les plus discriminantes dans le processus d'identification des enfants à haut potentiel intellectuel à partir de la méthode abrégée. D'autres aptitudes cognitives sont également fortement liées aux capacités intellectuelles et aux performances scolaires comme les capacités attentionnelles (Burns et al., 2009 ; Cowan et al., 2006 ; Schweizer & Moosbrugger, 2004 ; Schweizer et al., 2005 ; Tillman et al., 2009 ; Tourva et al., 2015) et la mémoire de travail (voir

Ackerman et al., 2005 pour une méta-analyse ; Chuderski, 2013 ; Cornoldi & Giofrè, 2014).

L'attention est fortement liée au développement des capacités intellectuelles (Johnson et al., 2003 ; Pascual-Leone, 1987 ; voir de Ribaupierre & Lecerf, 2017 pour une discussion). Cette aptitude cognitive a de multiples facettes. Parmi les différents aspects de l'attention, peu d'études ont investigué le développement des 3 réseaux attentionnels décrits par Posner et Petersen (1990 ; Petersen & Posner, 2012), c'est-à-dire l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif, auprès d'un échantillon d'enfants à haut potentiel intellectuel. Ce travail de thèse a pu montrer que le rythme développemental de chaque réseau attentionnel ne se distinguait pas entre les enfants à haut potentiel intellectuel et leurs pairs durant la fin de l'enfance jusqu'au début de l'adolescence. Toutefois, les enfants à haut potentiel intellectuel présentaient un contrôle exécutif plus performants que celui des enfants au développement typique. Le contrôle exécutif semble donc être une caractéristique importante chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Une abondante littérature a montré que le contrôle exécutif expliquerait les différences inter-individuelles dans le fonctionnement de la mémoire de travail (Engle et al., 1999; Kane et al., 2001).

La capacité de la mémoire de travail semble être également une aptitude cognitive fondamentale dans le fonctionnement du haut potentiel intellectuel (Alloway & Elsworth, 2012 ; Kornmann et al., 2015). Le niveau de performance en mémoire de travail serait responsable de la compensation des difficultés rencontrées dans le cadre des troubles des apprentissage chez les enfants « doublement exceptionnels » (van Viersen et al., 2014). Leurs capacités élevées en mémoire de travail semblent être

médiatisées par leur rapidité de réalisation de la tâche interférente, plutôt que par leurs capacités élevées au contrôle exécutif.

Ces caractéristiques cognitives sont importantes pour l'identification des enfants à haut potentiel intellectuel. Il serait donc important d'élaborer une batterie relativement courte avec des épreuves estimant ces aptitudes cognitives discriminantes. La procédure adaptative de l'évaluation de la mémoire de travail pourrait être généralisée à d'autres aptitudes cognitives afin d'éviter l'effet plafond souvent rencontré chez les enfants à haut potentiel intellectuel. Dans les études futures, ces évaluations cognitives devront être mises en lien avec l'adaptation des aménagements possibles afin d'évaluer leur efficacité (par ex. Shi et al., 2013). En résumé, l'utilisation de critères multiples dans le processus d'identification permettrait ainsi d'améliorer : 1) l'identification des enfants ayant un haut potentiel intellectuel ; 2) l'adaptation pédagogique ; 3) l'évaluation des aménagements mis en place.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abrahamse, E., van Dijck, J.-P., Majerus, S., & Fias, W. (2014). Finding the answer in space: the mental whiteboard hypothesis on serial order in working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 1–12. doi:10.3389/fnhum.2014.00932
- Abundis-Gutiérrez, A., Checa, P., Castellanos, C., & Rueda, M. R. (2014). Electrophysiological correlates of attention networks in childhood and early adulthood. *Neuropsychologia*, 57, 78–92. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2014.02.013
- Acar, S., Sen, S., & Cayirdag, N. (2016). Consistency of the Performance and Nonperformance Methods in Gifted Identification. *Gifted Child Quarterly*, 60, 81–101. doi:10.1177/0016986216634438
- Ackerman, P. L., Beier, M. E., & Boyle, M. O. (2005). Working Memory and Intelligence: The Same or Different Constructs? *Psychological Bulletin*, 131, 30–60. doi:10.1037/0033-2909.131.1.30
- Adolfstottir, S., Sorensen, L., & Lundervold, A. J. (2008). The attention network test: a characteristic pattern of deficits in children with ADHD. *Behavioral and Brain Functions*, 4(9), 1–9. doi:10.1186/1744-9081-4-9
- Alloway, T. P. (2009). Working Memory, but Not IQ, Predicts Subsequent Learning in Children with Learning Difficulties. *European Journal of Psychological Assessment*, 25, 92–98. doi:10.1027/1015-5759.25.2.92
- Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106, 20–29. doi:10.1016/j.jecp.2009.11.003
- Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2013). Working memory across the lifespan: A cross-sectional approach. *Journal of Cognitive Psychology*, 25, 84–93. doi:10.1080/20445911.2012.748027
- Alloway, T. P., & Elsworth, M. (2012). An investigation of cognitive skills and behavior in high ability students. *Learning and Individual Differences*, 22, 891–895. <http://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.02.001>
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2006). Verbal and Visuospatial Short-Term and Working Memory in Children: Are They Separable? *Child Development*, 77, 1698–1716. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00968.x
- American Psychological Association (2015). *APA Dictionary of Psychology* (2nd Ed.). Washington, DC, US: Author.
- Andersen, L. (2014). Visual–Spatial Ability: Important in STEM, Ignored in Gifted Education. *Roeper Review*, 36, 114–121. doi:10.1080/02783193.2014.884198
- Antón, E., Duñabeitia, J. A., Estévez, A., Hernández, J. A., Castillo, A., Fuentes, L. J., ... Carreiras, M. (2014). Is there a bilingual advantage in the ANT task? Evidence from children. *Frontiers in Psychology*, 5(398), 1–12. doi:10.3389/fpsyg.2014.00398

- Antshel, K. M. (2008). Attention-Deficit Hyperactivity Disorder in the context of a high intellectual quotient/giftedness. *Developmental Disabilities Research Reviews*, 14, 293–299. doi:10.1002/ddrr.34
- Antshel, K. M., Faraone, S. V., Stallone, K., Nave, A., Kaufmann, F. A., Doyle, A., ... Biederman, J. (2007). Is attention deficit hyperactivity disorder a valid diagnosis in the presence of high IQ? Results from the MGH Longitudinal Family Studies of ADHD. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48, 687–694. doi:10.1111/j.1469-7610.2007.01735.x
- Attout, L., Van der Kaa, M.-A., George, M., & Majerus, S. (2012). Dissociating short-term memory and language impairment: The importance of item and serial order information. *Aphasiology*, 26, 355–382. doi:10.1080/02687038.2011.604303
- Aubry, A., & Bourdin, B. (2016). Les tests BV9 et B53 peuvent-ils prédire la réussite scolaire ? *L'Orientation Scolaire et Professionnelle*, 43, 357–377. doi:10.4000/osp.5070
- Aubry, A., & Bourdin, B. (2018). *Development of attentional networks in intellectually gifted children*. Manuscript submitted for publication.
- Aubry, A., Gonthier, C. & Bourdin, B. (2018). *Explaining the high working memory capacity of gifted children: Contributions of processing skills and executive control*. Manuscript submitted for publication.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417–423. doi:10.1016/S1364-6613(00)01538-2
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1–29. doi:10.1146/annurev-psych-120710-100422
- Badeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G.H.Bower (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol.8, pp.47-89). doi:10.1016/S0079-7421(08)60452-1
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 83–100. doi:10.1037/0096-3445.133.1.83
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2012). As Time Goes By: Temporal Constraints in Working Memory. *Current Directions in Psychological Science*, 21, 413–419. doi:10.1177/0963721412459513
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2014). On the proper reading of the TBRS model: reply to Oberauer and Lewandowsky (2014). *Frontiers in Psychology*, 5, 1–3. doi:10.3389/fpsyg.2014.01331
- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., & Camos, V. (2009). Working memory span development: a time-based resource-sharing model account. *Developmental Psychology*, 45, 477–490. doi:10.1037/a0014615
- Bartels, M., Rietveld, M. J. H., Van Baal, G. C. M., & Boomsma, D. I. (2002). Genetic and environmental influences on the development of intelligence. *Behavior Genetics*, 32, 237–249. doi:10.1023/A:1019772628912

- Bates, T. C., Hansell, N. K., Martin, N. G., & Wright, M. J. (2016). When does socioeconomic status (SES) moderate the heritability of IQ? No evidence for  $g \times$  SES interaction for IQ in a representative sample of 1176 Australian adolescent twin pairs. *Intelligence*, *56*, 10–15. doi:10.1016/j.intell.2016.02.003
- Beilock, S. L., & Carr, T. H. (2005). When High-Powered People Fail. *Psychological Science*, *16*, 101–105. doi:10.1111/j.0956-7976.2005.00789.x
- Bélangier, J., & Gagné, F. (2006). Estimating the Size of the Gifted/Talented Population from Multiple Identification Criteria. *Journal for the Education of the Gifted*, *30*, 131–163. doi:10.4219/jeg-2006-258
- Beljan, P., Webb, J. T., Amend, E. R., Web, N. E., Goerss, J., & Olenchak, F. R. (2006). Misdiagnosis and Dual Diagnoses of Gifted Children and Adults: ADHD, Bipolar, OCD, Asperger's, Depression, and Other Disorders. *Gifted and Talented International*, *21*, 83–86. doi:10.1080/15332276.2006.11673478
- Bernard, P. (2010). Le Trésor de la langue française informatisé. *Traduire*, *222*, 125–136. doi:10.4000/traduire.458
- Booth, J. E., Carlson, C. L., & Tucker, D. M. (2007). Performance on a neurocognitive measure of alerting differentiates ADHD combined and inattentive subtypes: a preliminary report. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *22*, 423–432. doi:10.1016/j.acn.2007.01.017
- Boschi, A., Planche, P., Hemimou, C., Demily, C., & Vaivre-Douret, L. (2016). From High Intellectual Potential to Asperger Syndrome: Evidence for Differences and a Fundamental Overlap—A Systematic Review. *Frontiers in Psychology*, *7*, 79–16. doi:10.3389/fpsyg.2016.01605
- Botta, F., Santangelo, V., Raffone, A., Lupiàñez, J., & Belardinelli, M. O. (2010). Exogenous and endogenous spatial attention effects on visuospatial working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*, 1590–1602. doi:10.1080/17470210903443836
- Blum, D., & Holling, H. (2017). Spearman's law of diminishing returns. A meta-analysis. *Intelligence*, *65*, 60–66. doi:10.1016/j.intell.2017.07.004
- Bramlett-Parker, J., & Washburn, D. (2016). Can Rhesus Monkeys Learn Executive Attention? *Behavioral Sciences*, *6*(2), 11–15. doi:10.3390/bs6020011
- Brasseur, S., & Grégoire, J. (2010). L'intelligence émotionnelle – trait chez les adolescents à haut potentiel : spécificités et liens avec la réussite scolaire et les compétences sociales. *Enfance*, *1*, 59–76. doi:10.4074/S0013754510001060
- Briggs, C. J., Reis, S. M., & Sullivan, E. E. (2008). A National View of Promising Programs and Practices for Culturally, Linguistically, and Ethnically Diverse Gifted and Talented Students. *Gifted Child Quarterly*, *52*, 131–145. doi:10.1177/0016986208316037
- Brody, N. (2003). Construct validation of the Sternberg Triarchic Abilities Test. *Intelligence*, *31*, 319–329. doi:10.1016/S0160-2896(01)00087-3

- Brown, S. W. (1984). The use of WISC-R subtest scatter in the identification of intellectually gifted handicapped children: An inappropriate task? *Roeper Review*, 7, 20–23. doi:10.1080/02783198409552836
- Buehner, M., Krumm, S., & Pick, M. (2005). Reasoning = working memory  $\neq$  attention. *Intelligence*, 33, 251–272. doi:10.1016/j.intell.2005.01.002
- Burns, N. R., Nettelbeck, T., & McPherson, J. (2009). Attention and Intelligence: A Factor Analytic Study. *Journal of Individual Differences*, 30, 44–57. doi:10.1027/1614-0001.30.1.44
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 215–222. doi:10.1016/S1364-6613(00)01483-2
- Calero, M. D., Belen, G.-M. M., & Robles, M. A. (2011). Learning Potential in high IQ children: The contribution of dynamic assessment to the identification of gifted children. *Learning and Individual Differences*, 21, 176–181. doi:10.1016/j.lindif.2010.11.025
- Calero, M. D., García-Martín, M. B., Jiménez, M. I., Kazén, M., & Araque, A. (2007). Self-regulation advantage for high-IQ children: Findings from a research study. *Learning and Individual Differences*, 17, 328–343. doi:10.1016/j.lindif.2007.03.012
- Callejas, A., Lupiáñez, J., Funes, M. J., & Tudela, P. (2005). Modulations among the alerting, orienting and executive control networks. *Experimental Brain Research*, 167, 27–37. doi:10.1007/s00221-005-2365-z
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014a). Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie Française*, 59, 21–39. doi:10.1016/j.psfr.2012.12.003
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014b). Attentional and non-attentional systems in the maintenance of verbal information in working memory: the executive and phonological loops. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 1–11. doi:10.3389/fnhum.2014.00900
- Canivez, G. L., Watkins, M. W., & Dombrowski, S. C. (2016). Factor structure of the Wechsler Intelligence Scale for Children–Fifth Edition: Exploratory factor analyses with the 16 primary and secondary subtests. *Psychological Assessment*, 28, 975–986. doi:10.1037/pas0000238
- Cao, T. H., Jung, J. Y., & Lee, J. (2017). Assessment in Gifted Education: A Review of the Literature From 2005 to 2016. *Journal of Advanced Academics*, 28, 163–203. doi:10.1177/1932202X17714572
- Cao, Q., Zang, Y., Zhu, C., Cao, X., Sun, L., Zhou, X., & Wang, Y. (2008). Alerting deficits in children with attention deficit/hyperactivity disorder: Event-related fMRI evidence. *Brain Research*, 1219, 159–168. doi:10.1016/j.brainres.2008.04.028
- Carman, C. A. (2013). Comparing Apples and Oranges. *Journal of Advanced Academics*, 24, 52–70. doi:10.1177/1932202X12472602

- Caropreso, E. J., & White, C. S. (1994). Analogical Reasoning and Giftedness: A Comparison Between Identified Gifted and Nonidentified Children. *The Journal of Educational Research*, *87*, 271–278. doi:10.1080/00220671.1994.9941254
- Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Case, R. (1972). Validation of a neo-Piagetian mental capacity construct. *Journal of Experimental Child Psychology*, *14*, 287–302. doi:10.1016/0022-0965(72)90051-3
- Castejón, J. L., Gilar, R., Miñano, P., & González, M. (2016). Latent class cluster analysis in exploring different profiles of gifted and talented students. *Learning and Individual Differences*, *50*, 166–174. doi:10.1016/j.lindif.2016.08.003
- Cattell, R. B. (1963). Theory of Fluid and Crystallized Intelligence: A Critical Experiment. *Journal of Educational Psychology*, *54*, 1-22.
- Checa, P., & Rueda, M. R. (2011). Behavioral and brain measures of executive attention and school competence in late childhood. *Developmental Neuropsychology*, *36*, 1018–1032. doi:10.1080/87565641.2011.591857
- Cho, S., Ahn, D., Han, S., & Park, H. (2008). Academic developmental patterns of the Korean gifted during the 18 years after identification. *Personality and Individual Differences*, *45*, 784–789. doi:10.1016/j.paid.2008.08.007
- Chooi, W.-T., Long, H., & Thompson, L. (2014). The Sternberg Triarchic Abilities Test (Level-H) is a Measure of g. *Journal of Intelligence*, *2*(3), 56–67. doi:10.3390/jintelligence2030056
- Chuderski, A. (2013). When are fluid intelligence and working memory isomorphic and when are they not? *Intelligence*, *41*, 244–262. doi:10.1016/j.intell.2013.04.003
- Chuderski, A. (2014). High intelligence prevents the negative impact of anxiety on working memory. *Cognition and Emotion*, *29*, 1197–1209. doi:10.1080/02699931.2014.969683
- Chuderski, A., Taraday, M., Nęcka, E., & Smoleń, T. (2012). Storage capacity explains fluid intelligence but executive control does not. *Intelligence*, *40*, 278–295. doi:10.1016/j.intell.2012.02.010
- Chun, M. M., Golomb, J. D., & Turk-Browne, N. B. (2011). A Taxonomy of External and Internal Attention. *Annual Review of Psychology*, *62*, 73–101. doi:10.1146/annurev.psych.093008.100427
- Cohn, S. J., Carlson, J. S., & Jensen, A. R. (1985). Speed of information processing in academically gifted youths. *Personality and Individual Differences*, *6*, 621–629. doi:10.1016/0191-8869(85)90012-1
- Colom, R., Rebollo, I., Abad, F. J., & Shih, P. C. (2006). Complex span tasks, simple span tasks, and cognitive abilities: A reanalysis of key studies. *Memory & Cognition*, *34*, 158–171. doi:10.3758/BF03193395

- Conway, A. R. A., Cowan, N., Bunting, M. F., Theriault, D. J., & Minkoff, S. R. B. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, *30*, 163–183. doi:10.1016/S0160-2896(01)00096-4
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*, 769–786. doi:10.3758/BF03196772
- Conway, A. R. A., & Kovacs, K. (2015). New and emerging models of human intelligence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *6*, 419–426. doi:10.1002/wcs.1356
- Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The Reorienting System of the Human Brain: From Environment to Theory of Mind. *Neuron*, *58*, 306–324. doi:10.1016/j.neuron.2008.04.017
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 201–215. doi:10.1038/nrn755
- Corbin, L., Borel, D., & Camos, V. (2013). Dissociation mémoire de travail-vitesse de traitement chez les enfants intellectuellement précoces au travers de deux études de cas. *Enfance*, *4*, 373–387. doi:10.4074/S0013754512004028
- Cornoldi, C., & Giofrè, D. (2014). The Crucial Role of Working Memory in Intellectual Functioning. *European Psychologist*, *19*, 260–268. doi:10.1027/1016-9040/a000183
- Cortese, S., Ferrin, M., Brandeis, D., Buitelaar, J., Daley, D., Dittmann, R. W., ... European ADHD Guidelines Group (EAGG). (2015). Cognitive training for attention-deficit/hyperactivity disorder: meta-analysis of clinical and neuropsychological outcomes from randomized controlled trials. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, *54*, 164–174. doi:10.1016/j.jaac.2014.12.010
- Coull, J. T. (1998). Neural correlates of attention and arousal: insights from electrophysiology, functional neuroimaging and psychopharmacology. *Progress in Neurobiology*, *55*, 343–361. doi:10.1016/S0301-0082(98)00011-2
- Coull, J. T., Nobre, A. C., & Frith, C. D. (2001). The Noradrenergic  $\alpha_2$  Agonist Clonidine Modulates Behavioural and Neuroanatomical Correlates of Human Attentional Orienting and Alerting. *Cerebral Cortex*, *11*, 73–84. doi:10.1093/cercor/11.1.73
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, *104*, 163–191. doi:10.1037/0033-2909.104.2.163
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87–114. doi:10.1017/S0140525X01003922

- Cowan, N. (2008). What are the differences between long-term, short-term, and working memory? In W. S. Sossin, J. C. Lacaille, V. F. Castellucci, & S. Belleville (Eds.), *Progress in Brain Research* (Vol. 169, pp. 323–338). doi: 10.1016/S0079-6123(07)00020-9
- Cowan, N. (2017). The many faces of working memory and short-term storage. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(4), 1–13. doi:10.3758/s13423-016-1191-6
- Cowan, N., & Alloway, T. P. (2009). The Development of Memory in Infancy and Childhood. In M. L. Courage & N. Cowan (Eds.), *The development of memory in infancy and childhood* (2nd Ed., pp. 303–342). New York: Psychology Press.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. A. (2005). On the capacity of attention: its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51, 42–100. doi:10.1016/j.cogpsych.2004.12.001
- Cowan, N., Fristoe, N. M., Elliott, E. M., Brunner, R. P., & Saults, J. S. (2006). Scope of attention, control of attention, and intelligence in children and adults. *Memory & Cognition*, 34, 1754–1768. doi:10.3758/BF03195936
- Cowan, N., Towse, J. N., Hamilton, Z., Saults, J. S., Elliott, E. M., Lacey, J. F., ... Hitch, G. J. (2003). Children's working-memory processes: A response-timing analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 113–132. doi: 10.1037/0096-3445.132.1.113
- Coyle, T. R., Read, L. E., Gaultney, J. F., & Bjorklund, D. F. (1998). Giftedness and variability in strategic processing on a multitrial memory task: Evidence for stability in gifted cognition. *Learning and Individual Differences*, 10, 273–290. doi:10.1016/S1041-6080(99)80123-X
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450–466. doi: 10.1016/S0022-5371(80)90312-6
- Deary, I. J., Spinath, F. M., & Bates, T. C. (2006). Genetics of intelligence. *European Journal of Human Genetics*, 14, 690–700. doi:10.1038/sj.ejhg.5201588
- Deary, I. J., Whiteman, M. C., Starr, J. M., Whalley, L. J., & Fox, H. C. (2004). The Impact of Childhood Intelligence on Later Life: Following Up the Scottish Mental Surveys of 1932 and 1947. *Journal of Personality and Social Psychology*, 86, 130–147. doi:10.1037/0022-3514.86.1.130
- Deary, I. J., Yang, J., Davies, G., Harris, S. E., Tenesa, A., Liewald, D., et al. (2012). Genetic contributions to stability and change in intelligence from childhood to old age. *Nature*, 482, 212–215. doi:10.1038/nature10781
- Delaubier, J.-P. (2002). *La scolarisation des élèves « intellectuellement précoces »*. Rapport à Monsieur le Ministre de l'Éducation Nationale. Paris: Ministère de l'Éducation Nationale.
- Demetriou, A., Mouyi, A., & Spanoudis, G. (2008). Modelling the structure and development of g. *Intelligence*, 36, 437–454. doi:10.1016/j.intell.2007.10.002

- Dixon, F. A., Cross, T. L., & Adams, C. M. (2001). Psychological characteristics of academically gifted students in a residential setting: A cluster analysis. *Psychology in the Schools, 38*, 433–445. doi:10.1002/pits.1032
- Draheim, C., Hicks, K. L., & Engle, R. W. (2016). Combining Reaction Time and Accuracy: The Relationship Between Working Memory Capacity and Task Switching as a Case Example. *Perspectives on Psychological Science, 11*, 133–155. doi:10.1177/1745691615596990
- Duan, X., Dan, Z., & Shi, J. (2013). The Speed of Information Processing of 9- to 13-Year-Old Intellectually Gifted Children. *Psychological Reports, 112*, 20–32. doi:10.2466/04.10.49.PR0.112.1.20-32
- Duan, X., Shi, J., & Dan, Z. (2009). Developmental Changes in Processing Speed: Influence of Accelerated Education for Gifted Children. *Gifted Child Quarterly, 54*, 85–91. doi:10.1177/0016986209355971
- Duan, X., Shi, J., Wu, J., Mou, Y., Cui, H., & Wang, G. (2009). Electrophysiological correlates for response inhibition in intellectually gifted children: A Go/NoGo study. *Neuroscience Letters, 457*, 45–48. doi:10.1016/j.neulet.2009.04.006
- Engel de Abreu, P. M. J., Conway, A. R. A., & Gathercole, S. E. (2010). Working memory and fluid intelligence in young children. *Intelligence, 38*, 552–561. doi:10.1016/j.intell.2010.07.003
- Engle, R. W. (2018). Working Memory and Executive Attention: A Revisit. *Perspectives on Psychological Science, 13*, 190–193. doi:10.1177/1745691617720478
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General, 128*, 309–331. doi:10.1037/0096-3445.128.3.309
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics, 16*, 143–149. doi:10.3758/BF03203267
- Erwin, J. O., & Worrell, F. C. (2011). Assessment Practices and the Underrepresentation of Minority Students in Gifted and Talented Education. *Journal of Psychoeducational Assessment, 30*, 74–87. doi:10.1177/0734282911428197
- Evers, A., Muñiz, J., Bartram, D., Boben, D., Egeland, J., Fernández-Hermida, J. R., ... Urbánek, T. (2012). Testing Practices in the 21st Century. *European Psychologist, 17*, 300–319. doi:10.1027/1016-9040/a000102
- Façon, B., Bollengier, T., & Grubar, J.-C. (1994). Déficience mentale : influence de la dissociation entre efficacité et expérience. *Enfance, 47*, 71–81. doi:10.3406/enfan.1994.2085
- Fan, J., Flombaum, J. I., McCandliss, B. D., Thomas, K. M., & Posner, M. I. (2003). Cognitive and Brain Consequences of Conflict. *NeuroImage, 18*, 42–57. doi:10.1006/nimg.2002.1319



- Fan, J., McCandliss, B. D., Fossella, J., Flombaum, J. I., & Posner, M. I. (2005). The activation of attentional networks. *NeuroImage*, *26*, 471–479. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.02.004
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the Efficiency and Independence of Attentional Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*, 340–347. doi:10.1162/089892902317361886
- Felten, D. L., & Shetty, A. N. (2010). *Netter's Atlas of Neuroscience* (2nd Ed.). Philadelphia, PA: Elsevier Saunders.
- Fernández, E., García, T., Arias-Gundín, O., Vázquez, A., & Rodríguez, C. (2017). Identifying Gifted Children: Congruence among Different IQ Measures. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1-10. doi:10.3389/fpsyg.2017.01239
- Fink, A., & Neubauer, A. C. (2001). Speed of information processing, psychometric intelligence. *Personality and Individual Differences*, *30*, 1009–1021. doi:10.1016/S0191-8869(00)00089-1
- Foley Nicpon, M., Assouline, S. G., & Colangelo, N. (2013). Twice-Exceptional Learners. *Gifted Child Quarterly*, *57*, 169–180. doi:10.1177/0016986213490021
- Fossella, J., Sommer, T., Fan, J., Wu, Y., Swanson, J. M., Pfaff, D. W., & Posner, M. I. (2002). Assessing the molecular genetics of attention networks. *BMC Neuroscience*, *3*, 14–11. doi:10.1186/1471-2202-3-14
- Friedman-Nimz, R. (2009). Myth 6: Cosmetic Use of Multiple Selection Criteria. *Gifted Child Quarterly*, *53*, 248–250. doi:10.1177/0016986209346925
- Friso-van den Bos, I., van der Ven, S. H. G., Kroesbergen, E. H., & van Luit, J. E. H. (2013). Working memory and mathematics in primary school children: A meta-analysis. *Educational Research Review*, *10*, 29–44. doi:10.1016/j.edurev.2013.05.003
- Fry, A. F., & Hale, S. (2000). Relationships among processing speed, working memory, and fluid intelligence in children. *Biological Psychology*, *54*, 1–34. doi:10.1016/S0301-0511(00)00051-X
- Fugate, C. M., Zentall, S. S., & Gentry, M. (2013). Creativity and Working Memory in Gifted Students With and Without Characteristics of Attention Deficit Hyperactive Disorder. *Gifted Child Quarterly*, *57*, 234–246. doi:10.1177/0016986213500069
- Gagné, F. (1985). Giftedness and Talent: Reexamining a Reexamination of the Definitions. *Gifted Child Quarterly*, *29*, 103–112. doi:10.1177/001698628502900302
- Gagné, F. (1998). A Proposal for Subcategories Within Gifted or Talented Populations. *Gifted Child Quarterly*, *42*, 87–95. doi:10.1177/001698629804200203
- Gagné, F. (2004). Transforming gifts into talents: the DMGT as a developmental theory. *High Ability Studies*, *15*, 119–147. doi:10.1080/1359813042000314682

- Gagné, F. (2005). From Gifts to Talents: The DMGT as a Developmental Model. In Sternberg, R. J. & Davidson, J. E. (Eds.), *Conceptions of Giftedness* (2nd Ed.). New York, NY: Cambridge University Press.
- Gagné, F. (2010). Motivation within the DMGT 2.0 framework. *High Ability Studies*, 21, 81–99. doi:10.1080/13598139.2010.525341
- Gagné, F. (2018). *Developing Academic Talent: DMGT Principles and best practices*. Presentation at 16th Conference of the European Council for High Ability (ECHA), Dublin, Ireland.
- Gardner, H. (1997). *Les formes de l'intelligence*. Paris: Odile Jacob.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40, 177–190. doi:10.1037/0012-1649.40.2.177
- Gaultney, J. F., Bjorklund, D. F., & Goldstein, D. (1996). To Be Young, Gifted, and Strategic: Advantages for Memory Performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 61, 43–66. doi:10.1006/jecp.1996.0002
- Gazzaley, A., & Nobre, A. C. (2012). Top-down modulation: bridging selective attention and working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 128–134. doi:10.1016/j.tics.2011.11.014
- Geake, J. G. (2008). High Abilities at Fluid Analogizing: A Cognitive Neuroscience Construct of Giftedness. *Roeper Review*, 30, 187–195. doi:10.1080/02783190802201796
- Geary, D. C., & Brown, S. C. (1991). Cognitive Addition: Strategy Choice and Speed-of-Processing Differences in Gifted, Normal, and Mathematically Disabled Children. *Developmental Psychology*, 27, 398–406.
- Gignac, G. E. (2014). Fluid intelligence shares closer to 60% of its variance with working memory capacity and is a better indicator of general intelligence. *Intelligence*, 47, 122–133. doi:10.1016/j.intell.2014.09.004
- Gignac, G. E. (2015). Raven's is not a pure measure of general intelligence: Implications for g factor theory and the brief measurement of g. *Intelligence*, 52, 71–79. doi:10.1016/j.intell.2015.07.006
- Gimmig, D., Huguet, P., Caverni, J.-P., & Cury, F. (2006). Choking under pressure and working memory capacity: When performance pressure reduces fluid intelligence. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13, 1005–1010. doi:10.3758/BF03213916
- Giofrè, D., Mammarella, I. C., & Cornoldi, C. (2013). The structure of working memory and how it relates to intelligence in children. *Intelligence*, 41, 396–406. doi:10.1016/j.intell.2013.06.006
- Giofrè, D., Toffalini, E., Altoè, G., & Cornoldi, C. (2017). Intelligence measures as diagnostic tools for children with specific learning disabilities. *Intelligence*, 140–145. doi:10.1016/j.intell.2017.01.014

- Gonthier, C., Aubry, A., & Bourdin, B. (2018). Measuring working memory capacity in children using adaptive tasks: Example validation of an adaptive complex span. *Behavior Research Methods*, *50*, 910–921. doi:10.3758/s13428-017-0916-4
- Gonthier, C., Thomassin, N., & Roulin, J.-L. (2015). The composite complex span: French validation of a short working memory task. *Behavior Research Methods*, *48*, 233–242. doi:10.3758/s13428-015-0566-3
- Gottfredson, L. S. (1997a). Mainstream science on intelligence: An editorial with 52 signatories, history, and bibliography. *Intelligence*, *24*, 13–23. doi:10.1016/S0160-2896(97)90011-8
- Gottfredson, L. S. (1997b). Why g matters: The complexity of everyday life. *Intelligence*, *24*, 79–132. [http://doi.org/10.1016/S0160-2896\(97\)90014-3](http://doi.org/10.1016/S0160-2896(97)90014-3)
- Gow, A. J., Johnson, W., Pattie, A., Brett, C. E., Roberts, B., Starr, J. M., & Deary, I. J. (2011). Stability and change in intelligence from age 11 to ages 70, 79, and 87: The Lothian Birth Cohorts of 1921 and 1936. *Psychology and Aging*, *26*, 232–240. doi:10.1037/a0021072
- Gray, J. R., Chabris, C. F., & Braver, T. S. (2003). Neural mechanisms of general fluid intelligence. *Nature Neuroscience*, *6*, 316–322. doi:10.1038/nn1014
- Gray, S., Green, S., Alt, M., Hogan, T., Kuo, T., Brinkley, S., & Cowan, N. (2017). The structure of working memory in young children and its relation to intelligence. *Journal of Memory and Language*, *92*, 183–201. doi:10.1016/j.jml.2016.06.004
- Green, A. E., Munafò, M. R., DeYoung, C. G., Fossella, J. A., Fan, J., & Gray, J. R. (2008). Using genetic data in cognitive neuroscience: from growing pains to genuine insights. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*, 710–720. doi:10.1038/nrn2461
- Grégoire, J. (2009). *L'examen clinique de l'intelligence de l'enfant. Fondements et pratique du WISC-IV* (2e édition revue et complétée). Wavre: Mardaga.
- Grégoire, J. (2017). Les évolutions de l'examen des fonctions intellectuelles, entre tradition et innovation. *Enfance*, *4*, 443–460. doi:10.4074/S0013754517004062
- Grégoire, J., & Wierzbicki, C. (2007). Analyse de la dispersion des indices du WISC-IV en utilisant l'écart significatif par rapport à la moyenne des quatre indices. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, *57*, 101–106. doi:10.1016/j.erap.2006.05.002
- Grudnik, J. L., & Kranzler, J. H. (2001). Meta-analysis of the relationship between intelligence and inspection time. *Intelligence*, *29*, 523–535. doi:10.1016/S0160-2896(01)00078-2
- Guénoilé, F., Speranza, M., Louis, J., Fournieret, P., Revol, O., & Baleyte, J.-M. (2015). Wechsler profiles in referred children with intellectual giftedness: Associations with trait-anxiety, emotional dysregulation, and heterogeneity of Piaget-like reasoning processes. *European Journal of Paediatric Neurology*, *19*, 402–410. doi:10.1016/j.ejpn.2015.03.006

- Guez, A., Panaïotis, T., Peyre, H., & Ramus, F. (2018). Predictors of the IQ-achievement gap in France: A longitudinal analysis. *Intelligence*, *69*, 104–116. doi:10.1016/j.intell.2018.05.008
- Gustafsson, J.-E., & Balke, G. (1993). General and Specific Abilities as Predictors of School Achievement. *Multivariate Behavioral Research*, *28*, 407–434. doi:10.1207/s15327906mbr2804\_2
- Hainselin, M., Aubry, A., & Bourdin, B. (2018). Improving teenagers' divergent thinking with improvisational theatre. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1–22. doi:10.3389/fpsyg.2018.01759
- Hale, S., Rose, N. S., Myerson, J., Strube, M. J., Sommers, M., Tye-Murray, N., & Spehar, B. (2011). The structure of working memory abilities across the adult life span. *Psychology and Aging*, *26*, 92–110. doi:10.1037/a0021483
- Hartnett, D. N., Nelson, J. M., & Rinn, A. N. (2004). Gifted or ADHD? The possibilities of misdiagnosis. *Roeper Review*, *26*, 73–76. doi:10.1080/02783190409554245
- Hauer, B. J. A., & MacLeod, C. M. (2006). Endogenous versus exogenous attentional cuing effects on memory. *Acta Psychologica*, *122*, 305–320. doi:10.1016/j.actpsy.2005.12.008
- Heaven, P. C. L., & Ciarrochi, J. (2012). When IQ is not everything: Intelligence, personality and academic performance at school. *Personality and Individual Differences*, *53*, 518–522. doi:10.1016/j.paid.2012.04.024
- Heeren, A., Maurage, P., Perrot, H., De Volder, A., Renier, L., Araneda, R., ... Philippot, P. (2014). Tinnitus specifically alters the top-down executive control sub-component of attention: Evidence from the Attention Network Task. *Behavioural Brain Research*, *269*, 147–154. doi:10.1016/j.bbr.2014.04.043
- Hoard, M. K., Geary, D. C., Byrd-Craven, J., & Nugent, L. (2008). Mathematical cognition in intellectually precocious first graders. *Developmental Neuropsychology*, *33*, 251–276. doi:10.1080/87565640801982338
- Hodges, J., Tay, J., Maeda, Y., & Gentry, M. (2018). A Meta-Analysis of Gifted and Talented Identification Practices. *Gifted Child Quarterly*, *62*, 147–174. doi:10.1177/0016986217752107
- Horn, J. L. & Cattell, R. B. (1966). Refinement and Test of the Theory of Fluid and Crystallized General Intelligences. *Journal of Educational Psychology*, *57*, 253-270.
- Hornung, C., Brunner, M., Reuter, R. A. P., & Martin, R. (2011). Children's working memory: Its structure and relationship to fluid intelligence. *Intelligence*, *39*, 210–221. doi:10.1016/j.intell.2011.03.002
- Hughes, M. M., Linck, J. A., Bowles, A. R., Koeth, J. T., & Bunting, M. F. (2013). Alternatives to switch-cost scoring in the task-switching paradigm: Their reliability and increased validity. *Behavior Research Methods*, *46*, 702–721. doi:10.3758/s13428-013-0411-5

- Ishigami, Y., Fisk, J. D., Wojtowicz, M., & Klein, R. M. (2013). Repeated measurement of the attention components of patients with multiple sclerosis using the Attention Network Test-Interaction (ANT-I): Stability, isolability, robustness, and reliability. *Journal of Neuroscience Methods*, *216*, 1–9. doi: 10.1016/j.jneumeth.2013.02.013
- Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2010). Repeated measurement of the components of attention using two versions of the Attention Network Test (ANT): Stability, isolability, robustness, and reliability. *Journal of Neuroscience Methods*, *190*, 117–128. doi:10.1016/j.jneumeth.2010.04.019
- Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2011). Repeated Measurement of the Components of Attention of Older Adults using the Two Versions of the Attention Network Test: Stability, Isolability, Robustness, and Reliability. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *3*, 1–13. doi:10.3389/fnagi.2011.00017
- Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2015). Repeated Measurement of the Components of Attention With Young Children Using the Attention Network Test: Stability, Isolability, Robustness, and Reliability. *Journal of Cognition and Development*, *16*, 144–159. doi:10.1080/15248372.2013.803971
- Jaušovec, N. (2000). Differences in Cognitive Processes Between Gifted, Intelligent, Creative, and Average Individuals While Solving Complex Problems: An EEG Study. *Intelligence*, *28*, 213–237. doi:10.1016/S0160-2896(00)00037-4
- Johnson, E. S., Humphrey, M., Mellard, D. F., Woods, K., & Swanson, H. L. (2010). Cognitive Processing Deficits and Students with Specific Learning Disabilities: A Selective Meta-Analysis of the Literature. *Learning Disability Quarterly*, *33*, 3–18. doi:10.1177/073194871003300101
- Johnson, J., Im-Bolter, N., & Pascual-Leone, J. (2003). Development of Mental Attention in Gifted and Mainstream Children: The Role of Mental Capacity, Inhibition, and Speed of Processing. *Child Development*, *74*, 1594–1614. doi: 10.1046/j.1467-8624.2003.00626.x
- Johnson, W., Bouchard, T. J., Jr., Krueger, R. F., McGue, M., & Gottesman, I. I. (2004). Just one g: consistent results from three test batteries. *Intelligence*, *32*, 95–107. doi:10.1016/S0160-2896(03)00062-X
- Johnson, W., Nijenhuis, J. T., & Bouchard, T. J., Jr. (2008). Still just 1 g: Consistent results from five test batteries. *Intelligence*, *36*, 81–95. doi:10.1016/j.intell.2007.06.001
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, *99*, 122–149. doi: 10.1037/0033-295X.99.1.122
- Kail, R. V. (2007). Longitudinal Evidence That Increases in Processing Speed and Working Memory Enhance Children's Reasoning. *Psychological Science*, *18*, 312–313. doi:10.1111/j.1467-9280.2007.01895.x

- Kapa, L. L., & Colombo, J. (2013). Attentional control in early and later bilingual children. *Cognitive Development, 28*, 233–246. doi:10.1016/j.cogdev.2013.01.011
- Kane, M. J., Bleckley, M. K., Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (2001). A controlled-attention view of working-memory capacity. *Journal of Experimental Psychology: General, 130*, 169–183. doi:10.1037//0096-3445.130.2.169
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., & Conway, A. R. A. (2005). Working Memory Capacity and Fluid Intelligence Are Strongly Related Constructs: Comment on Ackerman, Beier, and Boyle (2005). *Psychological Bulletin, 131*, 66–71. doi:10.1037/0033-2909.131.1.66
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W., & Engle, R. W. (2004). The generality of working memory capacity: a latent-variable approach to verbal and visuospatial memory span and reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General, 133*, 189–217. doi:10.1037/0096-3445.133.2.189
- 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*, 1251–1259. doi:10.1111/j.1469-7610.2010.02257.x
- Keehn, B., Müller, R.-A., & Townsend, J. (2013). Atypical attentional networks and the emergence of autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 37*, 164–183. doi:10.1016/j.neubiorev.2012.11.014
- Keith, T. Z., Fine, J. G., Taub, G. E., Reynolds, M. R., & Kranzler, J. H. (2006). Higher Order, Multisample, Confirmatory Factor Analysis of the Wechsler Intelligence Scale for Children—Fourth Edition: What Does It Measure? *School Psychology Review, 35*, 108–127.
- Klein, R. M. (2003). Chronometric explorations of disordered minds. *Trends in Cognitive Sciences, 7*, 190–192. doi:10.1016/S1364-6613(03)00093-7
- Koke, L. C., & Vernon, P. A. (2003). The Sternberg Triarchic Abilities Test (STAT) as a measure of academic achievement and general intelligence. *Personality and Individual Differences, 35*, 1803–1807. doi:10.1016/S0191-8869(03)00005-9
- Konrad, K., Neufang, S., Hanisch, C., Fink, G. R., & 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*, 643–651. doi:10.1016/j.biopsych.2005.08.013
- Konrad, K., Neufang, S., Thiel, C. M., Specht, K., Hanisch, C., Fan, J., ... Fink, G. R. (2005). Development of attentional networks: An fMRI study with children and adults. *NeuroImage, 28*, 429–439. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.06.065

- Kornmann, J., Zettler, I., Kammerer, Y., Gerjets, P., & Trautwein, U. (2015). What characterizes children nominated as gifted by teachers? A closer consideration of working memory and intelligence. *High Ability Studies*, 26, 75–92. doi: 10.1080/13598139.2015.1033513
- Kovacs, K., & Conway, A. R. A. (2016). Process Overlap Theory: A Unified Account of the General Factor of Intelligence. *Psychological Inquiry*, 27, 151–177. doi: 10.1080/1047840X.2016.1153946
- Kranzler, J. H., Whang, P. A., & Jensen, A. R. (1994). Task Complexity and the Speed and Efficiency of Elemental Information Processing: Another Look at the Nature of Intellectual Giftedness. *Contemporary Educational Psychology*, 19, 447–459. doi:10.1006/ceps.1994.1032
- Kratz, O., Studer, P., Malcherek, S., Erbe, K., Moll, G. H., & Heinrich, H. (2011). Attentional processes in children with ADHD: An event-related potential study using the attention network test. *International Journal of Psychophysiology*, 81, 82–90. doi:10.1016/j.ijpsycho.2011.05.008
- Kroesbergen, E. H., van Hooijdonk, M., van Viersen, S., Middel-Lalleman, M. M. N., & Reijnders, J. J. W. (2015). The Psychological Well-Being of Early Identified Gifted Children. *Gifted Child Quarterly*, 60, 16–30. doi: 10.1177/0016986215609113
- Labouret, G., & Grégoire, J. (2018). La dispersion intra-individuelle et le profil des scores dans les QI élevés. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 154(30), 271–279.
- Lautrey, J. (2004). Hauts potentiels et talents : la position actuelle du problème. *Psychologie Française*, 49, 219–232. doi:10.1016/j.psfr.2004.03.001
- Lecerf, T., Bovet-Boone, F., Peiffer, E., Kieng, S., & Geistlich, S. (2016). WISC-IV GAI and CPI profiles in healthy children and children with learning disabilities. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 66, 101–107. doi:10.1016/j.erap.2016.04.001
- Lecerf, T., & Canivez, G. L. (2018). Complementary exploratory and confirmatory factor analyses of the French WISC-V: Analyses based on the standardization sample. *Psychological Assessment*, 30, 793–808. doi:10.1037/pas0000526
- Lecerf, T., Kieng, S., & Geistlich, S. (2015). Cohésion–non-cohésion des scores composites : valeurs seuils et interprétabilité. L'exemple du WISC-IV. *Pratiques Psychologiques*, 21, 155–171. doi:10.1016/j.prps.2015.02.001
- Lecerf, T., Reverte, I., Coleaux, L., Favez, N., & Rossier, J. (2010). Indice d'aptitude général pour le WISC-IV : normes francophones. *Pratiques Psychologiques*, 16, 109–121. doi:10.1016/j.prps.2009.04.001
- Leikin, M., Paz-Baruch, N., & Leikin, R. (2013). Memory abilities in generally gifted and excelling-in-mathematics adolescents. *Intelligence*, 41, 566–578. doi: 10.1016/j.intell.2013.07.018
- Lejeune, M. (2011). Tacit Knowledge: Revisiting the Epistemology of Knowledge. *McGill Journal of Education*, 46, 91–105. doi:10.7202/1005671ar

- Levy, P. (1968). Short-form tests: A methodological review. *Psychological Bulletin*, *69*, 410–416. doi:10.1037/h0025736
- Lewis, F. C., Reeve, R. A., & Johnson, K. A. (2016). A longitudinal analysis of the attention networks in 6- to 11-year-old children. *Child Neuropsychology*, *24*, 145–165. doi:10.1080/09297049.2016.1235145
- Liratni, M., & Pry, R. (2012). Profils psychométriques de 60 enfants à haut potentiel au WISC IV. *Pratiques Psychologiques*, *18*, 63–74. doi:10.1016/j.prps.2011.01.006
- Litster, K., & Roberts, J. (2010). The self-concepts and perceived competencies of gifted and non-gifted students: a meta-analysis. *Journal of Research in Special Educational Needs*, *11*, 130–140. doi:10.1111/j.1471-3802.2010.01166.x
- Liu, T., Xiao, T., Shi, J., & Zhao, D. (2011a). Response preparation and cognitive control of highly intelligent children: a Go-Nogo event-related potential study. *Neuroscience*, *180*, 122–128. doi:10.1016/j.neuroscience.2011.02.022
- Liu, T., Xiao, T., Shi, J., & Zhao, L. (2011b). Sensory gating, inhibition control and child intelligence: an event-related potentials study. *Neuroscience*, *189*, 250–257. doi:10.1016/j.neuroscience.2011.05.009
- Logie, R. H. (2011). The Functional Organization and Capacity Limits of Working Memory. *Current Directions in Psychological Science*, *20*, 240–245. doi:10.1177/0963721411415340
- Lovett, B. J., & Lewandowski, L. J. (2006). Gifted Students With Learning Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *39*, 515–527. doi:10.1177/00222194060390060401
- Lovett, B. J., & Sparks, R. L. (2011). The Identification and Performance of Gifted Students With Learning Disability Diagnoses. *Journal of Learning Disabilities*, *46*, 304–316. doi:10.1177/0022219411421810
- Lubart, T., Besançon, M., & Barbot, B. (2011). *Evaluation du Potentiel Créatif (EPoC)*. Paris: Hogrefe.
- Lubinski, D. (2009). Exceptional Cognitive Ability: The Phenotype. *Behavior Genetics*, *39*, 350–358. doi:10.1007/s10519-009-9273-0
- Lubinski, D. (2010). Spatial ability and STEM: A sleeping giant for talent identification and development. *Personality and Individual Differences*, *49*, 344–351. doi:10.1016/j.paid.2010.03.022
- Luciano, M., Posthuma, D., Wright, M. J., de Geus, E. J. C., Smith, G. A., Geffen, G. M., ...Martin N. G. (2005). Perceptual speed does not cause intelligence, and intelligence does not cause perceptual speed. *Biological Psychology*, *70*, 1–8. doi:10.1016/j.biopsycho.2004.11.011
- Maddocks, D. L. S. (2018). The Identification of Students Who Are Gifted and Have a Learning Disability: A Comparison of Different Diagnostic Criteria. *Gifted Child Quarterly*, *62*, 175–192. doi:10.1177/0016986217752096



- MacLeod, J. W., Lawrence, M. A., McConnell, M. M., Eskes, G. A., Klein, R. M., & Shore, D. I. (2010). Appraising the ANT: Psychometric and theoretical considerations of the Attention Network Test. *Neuropsychology*, 24, 637–651. doi:10.1037/a0019803
- Majerus, S. (2016). Optimisation et rééducation de la mémoire de travail : une synthèse critique. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 141, 167–174.
- Majerus, S. (2008). La mémoire verbale à court terme : un simple produit des interactions entre systèmes langagiers, attentionnels et de traitement de l'ordre sériel ? *Psychologie Française*, 53, 327–341. <http://doi.org/10.1016/j.psfr.2008.02.001>
- Van Der Maas, H. L. J., Dolan, C. V., Grasman, R. P. P. P., Wicherts, J. M., Huizenga, H. M., & Raijmakers, M. E. J. (2006). A dynamical model of general intelligence: The positive manifold of intelligence by mutualism. *Psychological Review*, 113, 842–861. doi:10.1037/0033-295X.113.4.842
- Margulies, A. S., & Floyd, R. G. (2009). A Preliminary Examination of the CHC Cognitive Ability Profiles of Children with High IQ and High Academic Achievement Enrolled in Services for Intellectual Giftedness. *Woodcock Munoz Foundation Press*, 1, 1–12.
- Matthews, M. S., & McBee, M. T. (2007). School Factors and the Underachievement of Gifted Students in a Talent Search Summer Program. *Gifted Child Quarterly*, 51, 167–181. doi:10.1177/0016986207299473
- McBee, M. T. (2006). A Descriptive Analysis of Referral Sources for Gifted Identification Screening by Race and Socioeconomic Status. *Journal of Secondary Gifted Education*, 17(2), 103–111. doi:10.4219/jsge-2006-686
- McBee, M. T., Peters, S. J., & Miller, E. M. (2016). The Impact of the Nomination Stage on Gifted Program Identification. *Gifted Child Quarterly*, 60, 258–278. <http://doi.org/10.1177/0016986216656256>
- McBee, M. T., Peters, S. J., & Waterman, C. (2013). Combining Scores in Multiple-Criteria Assessment Systems. *Gifted Child Quarterly*, 58, 69–89. doi:10.1177/0016986213513794
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A., & Hambrick, D. Z. (2010). The relationship between working memory capacity and executive functioning: evidence for a common executive attention construct. *Neuropsychology*, 24, 222–243. doi:10.1037/a0017619
- McClain, M.-C., & Pfeiffer, S. (2012). Identification of Gifted Students in the United States Today: A Look at State Definitions, Policies, and Practices. *Journal of Applied School Psychology*, 28, 59–88. doi:10.1080/15377903.2012.643757
- McCoach, D. B., Kehle, T. J., Bray, M. A., & Siegle, D. (2001). Best practices in the identification of gifted students with learning disabilities. *Psychology in the Schools*, 38, 403–411. doi:10.1002/pits.1029

- McCoach, D. B., Rambo, K. E., & Welsh, M. (2012). Assessing the Growth of Gifted Students. *Gifted Child Quarterly*, *57*, 56–67. doi:10.1177/0016986212463873
- McConnell, M. M., & Shore, D. I. (2011). Mixing measures: testing an assumption of the attention network test. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *73*, 1096–1107. doi:10.3758/s13414-010-0085-3
- McGill, R. J. (2016). Invalidating the Full Scale IQ Score in the Presence of Significant Factor Score Variability: Clinical Acumen or Clinical Illusion? *Archives of Assessment Psychology*, *6*, 49–79.
- McGill, R. J. (2017). Confronting the Base Rate Problem: More Ups and Downs for Cognitive Scatter Analysis. *Contemporary School Psychology*, *19*, 1–10. doi:10.1007/s40688-017-0168-4
- McGrew, K. S. (2009). CHC theory and the human cognitive abilities project: Standing on the shoulders of the giants of psychometric intelligence research. *Intelligence*, *37*, 1–10. doi:10.1016/j.intell.2008.08.004
- McIntosh, D. E., Dixon, F. A., & Pierson, E. E. (2012). Use of Intelligence Tests in the Identification of Giftedness. In D. P. Flanagan & P. L. Harrison (Eds.), *Contemporary Intellectual Assessment Theories, Tests, and Issues* (pp. 623–642). New York, NY: Guilford Press.
- Mezzacappa, E. (2004). Alerting, orienting, and executive attention: developmental properties and sociodemographic correlates in an epidemiological sample of young, urban children. *Child Development*, *75*, 1373–1386. doi:10.1111/j.1467-8624.2004.00746.x
- Meyer, K. N., Du, F., Parks, E., & Hopfinger, J. B. (2018). Exogenous vs. endogenous attention: Shifting the balance of fronto-parietal activity. *Neuropsychologia*, *111*, 307–316. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2018.02.006
- 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*, 49–100. doi:10.1006/cogp.1999.0734
- Molinero, C., Mata, S., Calero, M. D., García-Martín, M. B., & Araque-Cuenca, A. (2015). Usefulness of WISC-IV in Determining Intellectual Giftedness. *The Spanish Journal of Psychology*, *18*, 1–10. doi:10.1017/sjp.2015.63
- Moriya, J. (2017). Attentional networks and visuospatial working memory capacity in social anxiety. *Cognition and Emotion*, *32*, 158–166. doi:10.1080/02699931.2016.1263601
- Mundy, P., & Newell, L. (2016). Attention, Joint Attention, and Social Cognition. *Current Directions in Psychological Science*, *16*, 269–274. doi:10.1111/j.1467-8721.2007.00518.x
- Mullane, J. C., Corkum, P. V., Klein, R. M., McLaughlin, E. N., & Lawrence, M. A. (2010). Alerting, Orienting, and Executive Attention in Children With ADHD. *Journal of Attention Disorders*, *15*, 310–320. doi:10.1177/1087054710366384

- Mullane, J. C., Lawrence, M. A., Corkum, P. V., Klein, R. M., & McLaughlin, E. N. (2014). The development of and interaction among alerting, orienting, and executive attention in children. *Child Neuropsychology*, *22*, 155–176. doi: 10.1080/09297049.2014.981252
- Mullet, D. R., & Rinn, A. N. (2015). Giftedness and ADHD: Identification, Misdiagnosis, and Dual Diagnosis. *Roeper Review*, *37*, 195–207. doi: 10.1080/02783193.2015.1077910
- National Association for Gifted Children. (2008). *Use of the WISC-IV for gifted identification*. Washington, DC: Author. Retrieved from <http://www.nagc.com>.
- Neihart, M. (1999). The impact of giftedness on psychological well-being: What does the empirical literature say? *Roeper Review*, *22*, 10–17. doi: 10.1080/02783199909553991
- Newton, J. H., & McGrew, K. (2010). Introduction to the special issue: Current research in Cattell-Horn-Carroll-based assessment. *Psychology in the Schools*, *131*, 621–634. doi:10.1002/pits.20495
- Nusbaum, F., Hannoun, S., Kocevar, G., Stamile, C., Fournier, P., Revol, O., & Sappey-Marinier, D. (2017). Hemispheric Differences in White Matter Microstructure between Two Profiles of Children with High Intelligence Quotient vs. Controls: A Tract-Based Spatial Statistics Study. *Frontiers in Neuroscience*, *11*, 1–11. doi:10.3389/fnins.2017.00173
- Oberlin, B. G., Alford, J. L., & Marrocco, R. T. (2005). Normal attention orienting but abnormal stimulus alerting and conflict effect in combined subtype of ADHD. *Behavioural Brain Research*, *165*(1), 1–11. doi:10.1016/j.bbr.2005.06.041
- Ortiz-Tudela, J., Milliken, B., Jiménez, L., & Lupiáñez, J. (2018). Attentional influences on memory formation: A tale of a not-so-simple story. *Memory & Cognition*, *46*, 544–557. doi:10.3758/s13421-017-0784-2
- Oswald, F. L., McAbee, S. T., Redick, T. S., & Hambrick, D. Z. (2014). The development of a short domain-general measure of working memory capacity. *Behavior Research Methods*, *47*, 1343–1355. doi:10.3758/s13428-014-0543-2
- Parasuraman, R., Greenwood, P. M., Kumar, R., & Fossella, J. (2005). Beyond heritability: neurotransmitter genes differentially modulate visuospatial attention and working memory. *Psychological Science*, *16*, 200–207. doi:10.1111/j.0956-7976.2005.00804.x
- Pascual-Leone, J. (1987). Organismic Processes for Neo-Piagetian Theories: A Dialectical Causal Account of Cognitive Development. *International Journal of Psychology*, *22*, 531–570. doi:10.1080/00207598708246795
- Paz-Baruch, N., Leikin, M., Aharon-Peretz, J., & Leikin, R. (2014). Speed of information processing in generally gifted and excelling-in-mathematics adolescents. *High Ability Studies*, *25*, 143–167. doi: 10.1080/13598139.2014.971102

- Peng, P., & Fuchs, D. (2014). A Meta-Analysis of Working Memory Deficits in Children With Learning Difficulties. *Journal of Learning Disabilities, 49*, 3–20. doi:10.1177/0022219414521667
- Pereira, A. F., Smith, L. B., & Yu, C. (2013). A bottom-up view of toddler word learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 21*, 178–185. doi:10.3758/s13423-013-0466-4
- Pereira-Fradin, M. (2004). La variabilité intra-individuelle chez les enfants à haut potentiel intellectuel. *Psychologie Française, 49*, 253–266. doi:10.1016/j.psfr.2004.07.002
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual Review of Neuroscience, 35*, 73–89. doi:10.1146/annurev-neuro-062111-150525
- Pfeiffer, S. I., & Jarosewich, T. (2003). *Gifted Rating Scales* San Antonio, TX: Pearson.
- Pierson, E. E., Kilmer, L. M., Rothlisberg, B. A., & McIntosh, D. E. (2011). Use of Brief Intelligence Tests in the Identification of Giftedness. *Journal of Psychoeducational Assessment, 30*, 10–24. doi:10.1177/0734282911428193
- Pizzo, R., Urben, S., Van der Linden, M., Borradori-Tolsa, C., Freschi, M., Forcada-Guex, M., ... Barisnikov, K. (2010). Attentional networks efficiency in preterm children. *Journal of the International Neuropsychological Society, 16*, 130–137. doi:10.1017/S1355617709991032
- Planche, P. (2000). Le fonctionnement et le développement cognitifs de l'enfant intellectuellement précoce. *L'Année Psychologique, 100*, 503–525. doi:10.3406/psy.2000.28657
- Plucker, J. A., & Callahan, C. M. (2014). Research on Giftedness and Gifted Education. *Exceptional Children, 80*, 390–406. doi:10.1177/0014402914527244
- Posner, M. I. (1980). Orienting of Attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32*(1), 3–25. doi:10.1080/00335558008248231
- Posner, M. I. (2008). Measuring Alertness. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1129*, 193–199. doi:10.1196/annals.1417.011
- Posner, M. I. (2012). Imaging attention networks. *NeuroImage, 61*, 450–456. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.12.040
- Posner, M. I. (2016). Orienting of attention: Then and now. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 69*, 1864–1875. doi:10.1080/17470218.2014.937446
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience, 13*, 25–42. doi:10.1146/annurev.ne.13.030190.000325
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2014). Attention to Learning of School Subjects. *Trends in Neuroscience and Education, 3*, 14–17. doi:10.1016/j.tine.2014.02.003

- Posner, M. I., Rothbart, M. K., Sheese, B. E., & Voelker, P. (2012). Control networks and neuromodulators of early development. *Developmental Psychology, 48*, 827–835. doi:10.1037/a0025530
- Pozuelos, J. P., Paz-Alonso, P. M., Castillo, A., Fuentes, L. J., & Rueda, M. R. (2014). Development of attention networks and their interactions in childhood. *Developmental Psychology, 50*, 2405–2415. doi:10.1037/a0037469
- Preacher, K. J., Rucker, D. D., MacCallum, R. C., & Nicewander, W. A. (2005). Use of the Extreme Groups Approach: A Critical Reexamination and New Recommendations. *Psychological Methods, 10*, 178–192. doi:10.1037/1082-989X.10.2.178
- Prewett, P. N. (1995). A comparison of two screening tests (the Matrix Analogies Test—Short Form and the Kaufman Brief Intelligence Test) with the WISC-III. *Psychological Assessment, 7*, 69–72. doi:10.1037/1040-3590.7.1.69
- Prinzmetal, W., Zvinyatskovskiy, A., Gutierrez, P., & Dilem, L. (2009). Voluntary and involuntary attention have different consequences: the effect of perceptual difficulty. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 62*, 352–369. doi:10.1080/17470210801954892
- Rapport, M. D., Orban, S. A., Kofler, M. J., & Friedman, L. M. (2013). Do programs designed to train working memory, other executive functions, and attention benefit children with ADHD? A meta-analytic review of cognitive, academic, and behavioral outcomes. *Clinical Psychology Review, 33*, 1237–1252. doi:10.1016/j.cpr.2013.08.005
- Raven, J. (2000). The Raven's Progressive Matrices: Change and Stability over Culture and Time. *Cognitive Psychology, 41*, 1–48. doi:10.1006/cogp.1999.0735
- Raven, J., Raven, J. C. & Court, J. H. (1998). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 3, The Standard Progressive Matrices*. Oxford: Oxford Psychologists Press/San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Raz, A. (2004). Anatomy of attentional networks. *The Anatomical Record, 281B*, 21–36. doi:10.1002/ar.b.20035
- Raz, A., & Buhle, J. (2006). Typologies of attentional networks. *Nature Reviews Neuroscience, 7*, 367–379. doi:10.1038/nrn1903
- Redick, T. S., Broadway, J. M., Meier, M. E., Kuriakose, P. S., Unsworth, N., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2012). Measuring Working Memory Capacity With Automated Complex Span Tasks. *European Journal of Psychological Assessment, 28*, 164–171. doi:10.1027/1015-5759/a000123
- Redick, T. S., & Engle, R. W. (2006). Working memory capacity and attention network test performance. *Applied Cognitive Psychology, 20*, 713–721. doi:10.1002/acp.1224
- Reeve, C. L., & Bonaccio, S. (2011). On the myth and the reality of the temporal validity degradation of general mental ability test scores. *Intelligence, 39*, 255–272. doi:10.1016/j.intell.2011.06.009

- Reis, S. M., Baum, S. M., & Burke, E. (2014). An Operational Definition of Twice-Exceptional Learners. *Gifted Child Quarterly*, *58*, 217–230. doi:10.1177/0016986214534976
- Reis, S. M., & McCoach, D. B. (2000). The Underachievement of Gifted Students: What Do We Know and Where Do We Go? *Gifted Child Quarterly*, *44*, 152–170. doi:10.1177/001698620004400302
- Reis, S. M., & McCoach, D. B. (2002). Underachievement in Gifted and Talented Students With Special Needs. *Exceptionality*, *10*, 113–125. doi:10.1207/S15327035EX1002\_5
- Renzulli, J. S. (1978). What Makes Giftedness?: Reexamining a Definition. *Phi Delta Kappan*, *60*(3), 180–184. doi:10.1177/003172171109200821
- Renzulli, J. S. (2005). The Three-Ring Conception of Giftedness: A developmental model for promoting creative productivity. In Sternberg, R. J. & Davidson, J. E. (Eds.), *Conceptions of Giftedness* (2nd Ed.). New York, NY: Cambridge University Press.
- Renzulli, J. (2006). Qu'est-ce que le haut potentiel et comment peut-on le développer chez l'enfant et l'adolescent ? *Bulletin de Psychologie*, *485*, 463–468. doi:10.3917/bupsy.485.0463
- Renzulli, J. S. (2012). Reexamining the Role of Gifted Education and Talent Development for the 21st Century. *Gifted Child Quarterly*, *56*, 150–159. doi:10.1177/0016986212444901
- Reynolds, M. R. (2013). Interpreting the g loadings of intelligence test composite scores in light of Spearman's law of diminishing returns. *School Psychology Quarterly*, *28*, 63–76. doi:10.1037/spq0000013
- Reynolds, M. R., Keith, T. Z., Fine, J. G., Fisher, M. E., & Low, J. A. (2007). Confirmatory factor structure of the Kaufman Assessment Battery for Children--Second Edition: Consistency with Cattell-Horn-Carroll theory. *School Psychology Quarterly*, *22*, 511–539. doi:10.1037/1045-3830.22.4.511
- Reynolds, M. R., Keith, T. Z., Flanagan, D. P., & Alfonso, V. C. (2013). A cross-battery, reference variable, confirmatory factor analytic investigation of the CHC taxonomy. *Journal of School Psychology*, *51*, 535–555. doi:10.1016/j.jsp.2013.02.003
- de Ribaupierre, A., & Lecerf, T. (2017). Intelligence and Cognitive Development: Three Sides of the Same Coin. *Journal of Intelligence*, *5*(2), 1–15. doi:10.3390/jintelligence5020014
- Rinn, A. N., & Bishop, J. (2015). Gifted Adults: A Systematic Review and Analysis of the Literature. *Gifted Child Quarterly*, *59*, 213–235. doi:10.1177/0016986215600795
- Ristic, J., & Kingstone, A. (2012). A new form of human spatial attention: Automated symbolic orienting. *Visual Cognition*, *20*, 244–264. doi:10.1080/13506285.2012.658101

- Ritchie, S. J., & Tucker-Drob, E. M. (2018). How Much Does Education Improve Intelligence? A Meta-Analysis. *Psychological Science, 10*, 1–12. doi:10.1177/0956797618774253
- Robertson, I. H., Ridgeway, V., Greenfield, E., & Parr, A. (1997). Motor recovery after stroke depends on intact sustained attention: A 2-year follow-up study. *Neuropsychology, 11*, 290–295. doi:10.1037/0894-4105.11.2.290
- Robinson, N. M., Zigler, E., & Gallagher, J. J. (2000). Two tails of the normal curve: Similarities and differences in the study of mental retardation and giftedness. *American Psychologist, 55*, 1413–1424. doi:10.1037//0003-066X.55.12.1413
- Rohde, T. E., & Thompson, L. A. (2007). Predicting academic achievement with cognitive ability. *Intelligence, 35*, 83–92. doi:10.1016/j.intell.2006.05.004
- Ross-Sheehy, S., Oakes, L. M., & Luck, S. J. (2010). Exogenous attention influences visual short-term memory in infants. *Developmental Science, 14*, 490–501. doi:10.1111/j.1467-7687.2010.00992.x
- Rothbart, M. K., Sheese, B. E., Rueda, M. R., & Posner, M. I. (2011). Developing Mechanisms of Self-Regulation in Early Life. *Emotion Review, 3*, 207–213. doi:10.1177/1754073910387943
- Rowe, E. W., Dandridge, J., Pawlush, A., Thompson, D. F., & Ferrier, D. E. (2014). Exploratory and confirmatory factor analyses of the WISC-IV with gifted students. *School Psychology Quarterly, 29*, 536–552. doi:10.1037/spq0000009
- Rowe, E. W., Kingsley, J. M., & Thompson, D. F. (2010). Predictive ability of the General Ability Index (GAI) versus the Full Scale IQ among gifted referrals. *School Psychology Quarterly, 25*, 119–128. doi:10.1037/a0020148
- Rueda, M. R., Checa, P., & Rothbart, M. K. (2010). Contributions of Attentional Control to Socioemotional and Academic Development. *Early Education & Development, 21*, 744–764. <http://doi.org/10.1080/10409289.2010.510055>
- 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*, 1029–1040. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012
- Rueda, M. R., Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2005). The Development of Executive Attention: Contributions to the Emergence of Self-Regulation. *Developmental Neuropsychology, 28*, 573–594. doi:10.1207/s15326942dn2802\_2
- Rueda, M. R., Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Davis-Stober, C. P. (2004). Development of the time course for processing conflict: an event-related potentials study with 4 year olds and adults. *BMC Neuroscience, 5*, 1–13. doi:10.1186/1471-2202-5-39
- Salovey, P., & Mayer, J. D. (1990). Emotional Intelligence. *Imagination, Cognition and Personality, 9*, 185–211. doi:10.2190/DUGG-P24E-52WK-6CDG
- Schipolowski, S., Wilhelm, O., & Schroeders, U. (2014). On the nature of crystallized intelligence: the relationship between verbal ability and factual knowledge. *Intelligence, 46*, 156–168. doi:10.1016/j.intell.2014.05.014

- Schneider, W., Niklas, F., & Schmiedeler, S. (2014). Intellectual development from early childhood to early adulthood: The impact of early IQ differences on stability and change over time. *Learning and Individual Differences, 32*, 156–162. doi:10.1016/j.lindif.2014.02.001
- Schneider, W. J. (2013). What If We Took Our Models Seriously? Estimating Latent Scores in Individuals. *Journal of Psychoeducational Assessment, 31*, 186–201. doi:10.1177/0734282913478046
- Schneider, W. J., Mayer, J., & Newman, D. (2016). Integrating Hot and Cool Intelligences: Thinking Broadly about Broad Abilities. *Journal of Intelligence, 4*(1), 1–25. doi:10.3390/jintelligence4010001
- Schneider, W. J., & McGrew, K. S. (2012). The Cattell-Horn-Carroll model of intelligence. In D. P. Flanagan & P. L. Harrison (Eds.), *Contemporary intellectual assessment: Theories, tests, and issues* (pp. 99-144). New York, NY, US: Guilford Press.
- Schneider, W. J., & Newman, D. A. (2015). Intelligence is multidimensional: Theoretical review and implications of specific cognitive abilities. *Human Resource Management Review, 25*(1), 12–27. doi:10.1016/j.hrmr.2014.09.004
- Schweizer, K., & Moosbrugger, H. (2004). Attention and working memory as predictors of intelligence. *Intelligence, 32*, 329–347. doi:10.1016/j.intell.2004.06.006
- Schweizer, K., Moosbrugger, H., & Goldhammer, F. (2005). The structure of the relationship between attention and intelligence. *Intelligence, 33*, 589–611. doi:10.1016/j.intell.2005.07.001
- Schweizer, K., Zimmermann, P., & Koch, W. (2000). Sustained attention, intelligence, and the crucial role of perceptual processes. *Learning and Individual Differences, 12*, 271–286. doi:10.1016/S1041-6080(01)00040-1
- Shaw, P., Greenstein, D., Lerch, J., Clasen, L., Lenroot, R., Gogtay, N., ... Giedd, J. (2006). Intellectual ability and cortical development in children and adolescents. *Nature, 440*, 676–679. doi:10.1038/nature04513
- Sheppard, L. D., & Vernon, P. A. (2008). Intelligence and speed of information-processing: A review of 50 years of research. *Personality and Individual Differences, 44*, 535–551. doi:10.1016/j.paid.2007.09.015
- Shi, J., Li, Y., & Zhang, X. (2008). Self-Concept of Gifted Children Aged 9 to 13 Years Old. *Journal for the Education of the Gifted, 31*, 481–499. doi:10.4219/jeg-2008-791
- Shi, J., Tao, T., Chen, W., Cheng, L., Wang, L., & Zhang, X. (2013). Sustained Attention in Intellectually Gifted Children Assessed Using a Continuous Performance Test. *Plos One, 8*, 1–8. doi:10.1371/journal.pone.0057417
- Simonds, J., Kieras, J. E., Rueda, M. R., & Rothbart, M. K. (2007). Effortful control, executive attention, and emotional regulation in 7–10-year-old children. *Cognitive Development, 22*, 474–488. doi:10.1016/j.cogdev.2007.08.009



- Smeding, A., Darnon, C., & Van Yperen, N. W. (2015). Why do high working memory individuals choke? An examination of choking under pressure effects in math from a self-improvement perspective. *Learning and Individual Differences, 37*, 176–182. doi:10.1016/j.lindif.2014.11.005
- Spearman, C. (1904). “General Intelligence,” Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology, 15*, 201–92. doi:10.2307/1412107
- Stankov, L. (2017). Overemphasized "g". *Journal of Intelligence, 5*(4), 33–10. doi:10.3390/jintelligence5040033
- Steenbergen-Hu, S., & Moon, S. M. (2010). The Effects of Acceleration on High-Ability Learners: A Meta-Analysis. *Gifted Child Quarterly, 55*, 39–53. doi:10.1177/0016986210383155
- Steiner, H. H., & Carr, M. (2003). Cognitive Development in Gifted Children: Toward a More Precise Understanding of Emerging Differences in Intelligence. *Educational Psychology Review, 15*, 215–246. doi:10.1023/A:1024636317011
- Sternberg, R. J. (1993). *Sternberg Triarchic Abilities Test (Level H)*.
- Sternberg, R. J. (1999). The theory of successful intelligence. *Review of General Psychology, 3*, 292–316. doi:10.1037//1089-2680.3.4.292
- Sternberg, R. J. (2003). Our research program validating the triarchic theory of successful intelligence: reply to Gottfredson. *Intelligence, 31*, 399–413. doi:10.1016/S0160-2896(02)00143-5
- Sternberg, R. J., Castejón, J. L., Prieto, M. D., Hautamäki, J., & Grigorenko, E. L. (2001). Confirmatory Factor Analysis of the Sternberg Triarchic Abilities Test in Three International Samples. *European Journal of Psychological Assessment, 17*, 1–16. doi:10.1027//1015-5759.17.1.1
- Sternberg, R. J., & Davidson, J. E. (Eds.). (2005). *Conceptions of giftedness* (2nd ed.). New York, NY: Cambridge University Press.
- Sternberg, R. J., & Grigorenko, E. L. (2002). The Theory of Successful Intelligence as a Basis for Gifted Education. *Gifted Child Quarterly, 46*, 265–277. doi:10.1177/001698620204600403
- Sternberg, R. J., Wagner, R. K., Williams, W. M., & Horvath, J. A. (1995). Testing common sense. *American Psychologist, 50*, 912–927. doi:10.1037/0003-066X.50.11.912
- Stoddard, J., Beckett, L., & Simon, T. J. (2010). Atypical development of the executive attention network in children with chromosome 22q11.2 deletion syndrome. *Journal of Neurodevelopmental Disorders, 3*, 76–85. doi:10.1007/s11689-010-9070-3
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology, 18*, 643–662. doi:10.1037/h0054651
- von Stumm, S., & Plomin, R. (2014). Socioeconomic status and the growth of intelligence from infancy through adolescence. *Intelligence, 48*, 1–7. doi:10.1016/j.intell.2014.10.002

- Sturm, W., & Willmes, K. (2001). On the Functional Neuroanatomy of Intrinsic and Phasic Alertness. *NeuroImage*, *14*, S76–S84. doi:10.1006/nimg.2001.0839
- Swanson, H. L., Xinhua Zheng, & Jerman, O. (2009). Working Memory, Short-Term Memory, and Reading Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *42*, 260–287. doi:10.1177/0022219409331958
- Tellegen, A., & Briggs, P. F. (1967). Old wine in new skins: Grouping Wechsler subtests into new scales. *Journal of Consulting Psychology*, *31*(5), 499–506. doi:10.1037/h0024963
- Terrassier, J.-C. (1999). *Les enfants surdoués, ou la précocité embarrassante* (4e éd.). Paris: ESF.
- Thompson, L. A., & Oehlert, J. (2010). The etiology of giftedness. *Learning and Individual Differences*, *20*, 298–307. doi:10.1016/j.lindif.2009.11.004
- Tillman, C. M. (2011). Developmental change in the relation between simple and complex spans: A meta-analysis. *Developmental Psychology*, *47*, 1012–1025. doi:10.1037/a0021794
- Tillman, C. M., Bohlin, G., Sorensen, L., & Lundervold, A. J. (2009). Intelligence and Specific Cognitive Abilities in Children. *Journal of Individual Differences*, *30*, 209–219. doi:10.1027/1614-0001.30.4.209
- Toffalini, E., Giofrè, D., & Cornoldi, C. (2016). Strengths and Weaknesses in the Intellectual Profile of Different Subtypes of Specific Learning Disorder. *Clinical Psychological Science*, *5*, 402–409. <http://doi.org/10.1177/2167702616672038>
- Toffalini, E., Pezzuti, L., & Cornoldi, C. (2017). Einstein and dyslexia: Is giftedness more frequent in children with a specific learning disorder than in typically developing children? *Intelligence*, *62*, 175–179. doi:10.1016/j.intell.2017.04.006
- Torrance, E. P. (1974). *Torrance Test of Creative Thinking*. Lexington, MA: Personnel Press.
- Tourva, A., Spanoudis, G., & Demetriou, A. (2015). Cognitive correlates of developing intelligence: The contribution of working memory, processing speed and attention. *Intelligence*, *54*, 136–146. doi:10.1016/j.intell.2015.12.001
- Treffinger, D. J. (2009). Guest Editorial. *Gifted Child Quarterly*, *53*, 229–232. doi:10.1177/0016986209346950
- Tullo, D., Faubert, J., & Bertone, A. (2018). The characterization of attention resource capacity and its relationship with fluid reasoning intelligence: A multiple object tracking study. *Intelligence*, *69*, 158–168. doi:10.1016/j.intell.2018.06.001
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2012). Measuring Working Memory Capacity With Automated Complex Span Tasks. *European Journal of Psychological Assessment*, *28*, 164–171. doi:10.1027/1015-5759/a000123
- Unsworth, N., Redick, T. S., Heitz, R. P., Broadway, J. M., & Engle, R. W. (2009). Complex working memory span tasks and higher-order cognition: a latent-variable analysis of the relationship between processing and storage. *Memory*, *17*, 635–654. doi:10.1080/09658210902998047

- Unsworth, N., & Spillers, G. J. (2010). Working memory capacity: Attention control, secondary memory, or both? A direct test of the dual-component model. *Journal of Memory and Language*, *62*, 392–406. doi:10.1016/j.jml.2010.02.001
- Vaivre-Douret, L. (2004). Les caractéristiques développementales d’un échantillon d’enfants tout venant « à hautes potentialités » (surdoués) : suivi prophylactique. *Neuropsychiatrie de l’Enfance et de l’Adolescence*, *52*, 129–141. doi:10.1016/j.neurenf.2004.01.006
- Vaivre-Douret, L. (2011). Developmental and cognitive characteristics of “high-level potentialities” (highly gifted) children. *International Journal of Pediatrics*, *2011*, 1–14. doi:10.1155/2011/420297
- Vandierendonck, A. (2017). A comparison of methods to combine speed and accuracy measures of performance: A rejoinder on the binning procedure. *Behavior Research Methods*, *49*(2), 1–21. doi:10.3758/s13428-016-0721-5
- Vandierendonck, A. (2018). Further Tests of the Utility of Integrated Speed-Accuracy Measures in Task Switching. *Journal of Cognition*, *1*(1), 421–16. doi:10.5334/joc.6
- Vergauwe, E., Barrouillet, P., & Camos, V. (2010). Do Mental Processes Share a Domain-General Resource? *Psychological Science*, *21*, 384–390. doi:10.1177/0956797610361340
- van Viersen, S., de Bree, E. H., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Jong, P. F. (2015). Risk and protective factors in gifted children with dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *65*, 178–198. doi:10.1007/s11881-015-0106-y
- van Viersen, S., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Bree, E. H. (2014). High Reading Skills Mask Dyslexia in Gifted Children. *Journal of Learning Disabilities*, *49*, 189–199. doi:10.1177/0022219414538517
- Villatte, A., Courtinat-Camps, A., & de Léonardis, M. (2014). Typology of Self-Concept of Adolescents in France: A Comparison of Gifted and Nongifted French High School Students. *Roepers Review*, *36*, 30–42. doi:10.1080/02783193.2013.856828
- Villatte, A., Hugon, M., & de Léonardis, M. (2011). Forms of self-concept in gifted high school students enrolled in heterogeneous classes. *European Journal of Psychology of Education*, *26*, 373–392. doi:10.1007/s10212-011-0055-8
- Vock, M., & Holling, H. (2008). The measurement of visuo-spatial and verbal-numerical working memory: Development of IRT-based scales. *Intelligence*, *36*, 161–182. doi:10.1016/j.intell.2007.02.004
- Vock, M., Preckel, F., & Holling, H. (2011). Mental abilities and school achievement: A test of a mediation hypothesis. *Intelligence*, *39*, 357–369. doi:10.1016/j.intell.2011.06.006
- Vogelaar, B., Bakker, M., Elliott, J. G., & Resing, W. C. M. (2017). Dynamic testing and test anxiety amongst gifted and average-ability children. *The British Journal of Educational Psychology*, *87*, 75–89. doi:10.1111/bjep.12136

- Volker, M. A., Lopata, C., & Cook-Cottone, C. (2006). Assessment of children with intellectual giftedness and reading disabilities. *Psychology in the Schools, 43*, 855–869. doi:10.1002/pits.20193
- Vrignaud, P., Bonora, D., & Dreux, A. (2005). Counselling the Gifted and Talented in France: Minimizing Gift and Maximizing Talent. *International Journal for the Advancement of Counselling, 27*, 211–228. doi:10.1007/s10447-005-3182-6
- Waldon, J., Vriend, J., Davidson, F., & Corkum, P. (2015). Sleep and Attention in Children With ADHD and Typically Developing Peers. *Journal of Attention Disorders, 22*, 933–941. doi:10.1177/1087054715575064
- Wang, Y.-F., Jing, X.-J., Liu, F., Li, M.-L., Long, Z.-L., Yan, J. H., & Chen, H.-F. (2015). Reliable Attention Network Scores and Mutually Inhibited Inter-network Relationships Revealed by Mixed Design and Non-orthogonal Method. *Scientific Reports, 5*, 1–10. doi:10.1038/srep10251
- Warne, R. T. (2015). Five Reasons to Put the g Back Into Giftedness. *Gifted Child Quarterly, 60*, 3–15. doi:10.1177/0016986215605360
- Warne, R. T., Anderson, B., & Johnson, A. O. (2013). The Impact of Race and Ethnicity on the Identification Process for Giftedness in Utah. *Journal for the Education of the Gifted, 36*, 487–508. doi:10.1177/0162353213506065
- Warne, R. T., Astle, M. C., & Hill, J. C. (2018). What do undergraduates learn about human intelligence? An analysis of introductory psychology textbooks. *Archives of Scientific Psychology, 6*, 32–50. doi:10.1037/arc0000038
- Warne, R. T., Godwin, L. R., & Smith, K. V. (2013). Are There More Gifted People Than Would Be Expected in a Normal Distribution? An Investigation of the Overabundance Hypothesis. *Journal of Advanced Academics, 24*, 224–241. doi:10.1177/1932202X13507969
- Waszak, F., Li, S.-C., & Hommel, B. (2010). The development of attentional networks: Cross-sectional findings from a life span sample. *Developmental Psychology, 46*, 337–349. doi:10.1037/a0018541
- Waterhouse, L. (2006). Multiple Intelligences, the Mozart Effect, and Emotional Intelligence: A Critical Review. *Educational Psychologist, 41*, 207–225. doi:10.1207/s15326985ep4104\_1
- Watkins, M. W. (2003). IQ Subtest Analysis: Clinical Acumen or Clinical Illusion? *The Scientific Review of Mental Health Practice, 2*(2), 118–141.
- Watkins, M. W. (2005). Diagnostic validity of Wechsler subtest scatter. *Learning Disabilities: a Contemporary Journal, 3*(2), 20–29
- Watkins, M. W., Greenawalt, C. G., & Marcell, C. M. (2002). Factor Structure of the Wechsler Intelligence Scale for Children—Third Edition among Gifted Students. *Educational and Psychological Measurement, 62*, 164–172. doi:10.1177/0013164402062001011
- Watkins, M. W., & Smith, L. G. (2013). Long-term stability of the Wechsler Intelligence Scale for Children—Fourth Edition. *Psychological Assessment, 25*, 477–483. doi:10.1037/a0031653

- Watkins, M. W., & Worrell, F. C. (2000). Diagnostic utility of the number of WISC-III subtests deviating from mean performance among students with learning disabilities. *Psychology in the Schools, 37*, 303–309. doi:10.1002/1520-6807(2000)37:4<311::AID-PITS1>3.0.CO;2-X
- Webb, R. M., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2007). Spatial ability: A neglected dimension in talent searches for intellectually precocious youth. *Journal of Educational Psychology, 99*, 397–420. doi:10.1037/0022-0663.99.2.397
- Wechsler, D. (2005). *Manuel de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants – 4e édition* [Manual for the Wechsler Intelligence Scale for Children – fourth edition]. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Wechsler, D. (2016). *Manuel de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants 5e édition* [Manual for the Wechsler Intelligence Scale for Children – fifth edition]. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Weinbach, N., & Henik, A. (2013). The interaction between alerting and executive control: Dissociating phasic arousal and temporal expectancy. *Attention, Perception, & Psychophysics, 75*, 1374–1381. doi:10.3758/s13414-013-0501-6
- Weiss, L. G., Beal, A. L., Saklofske, D. H., Alloway, T. P., & Prifitera, A. (2008). Interpretation and intervention with WISC-IV in the clinical assessment context. In A. Prifitera, D. H. Saklofske, & L. G. Weiss (Eds.), *WISC-IV. Clinical assessment and intervention* (2nd Ed., pp. 3–66). San Diego, CA: Elsevier Inc.
- Weiss, L. G., Keith, T. Z., Zhu, J., & Chen, H. (2013). WISC-IV and Clinical Validation of the Four- and Five-Factor Interpretative Approaches. *Journal of Psychoeducational Assessment, 31*, 114–131. doi:10.1177/0734282913478032
- Westlye, L. T., Grydeland, H., Walhovd, K. B., & Fjell, A. M. (2010). Associations between Regional Cortical Thickness and Attentional Networks as Measured by the Attention Network Test. *Cerebral Cortex, 21*, 345–356. doi:10.1093/cercor/bhq101
- Wilhelm, O., Hildebrandt, A., & Oberauer, K. (2013). What is working memory capacity, and how can we measure it? *Frontiers in Psychology, 4*, 1–22. doi:10.3389/fpsyg.2013.00433
- Wilhelm, O., & Oberauer, K. (2006). Why are reasoning ability and working memory capacity related to mental speed? An investigation of stimulus–response compatibility in choice reaction time tasks. *European Journal of Cognitive Psychology, 18*(1), 18–50. doi:10.1080/09541440500215921
- Williams, R. H., & Zimmerman, D. W. (1996). Are Simple Gain Scores Obsolete? *Applied Psychological Measurement, 20*, 59–69. doi:10.1177/014662169602000106
- Williams, R. S., Biel, A. L., Wegier, P., Lapp, L. K., Dyson, B. J., & Spaniol, J. (2016). Age differences in the Attention Network Test: Evidence from behavior and event-related potentials. *Brain and Cognition, 102*, 65–79. doi:10.1016/j.bandc.2015.12.007

- Winner, E. (2000). Giftedness: Current Theory and Research. *Current Directions in Psychological Science*, *9*, 153–156. doi:10.1111/1467-8721.00082
- Worrell, F. C. (2009). Myth 4: A Single Test Score or Indicator Tells Us All We Need to Know About Giftedness. *Gifted Child Quarterly*, *53*, 242–244. doi:10.1177/0016986209346828
- Yang, S., & Yang, H. (2016). Bilingual effects on deployment of the attention system in linguistically and culturally homogeneous children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, *146*, 121–136. doi:10.1016/j.jecp.2016.01.011
- Yang, H., Yang, S., & Kang, C. (2014). The relationship between phonological awareness and executive attention in Chinese-English bilingual children. *Cognitive Development*, *30*, 65–80. doi:10.1016/j.cogdev.2013.11.003
- Yu, H., McCoach, D. B., Gottfried, A. W., & Gottfried, A. E. (2018). Stability of intelligence from infancy through adolescence: An autoregressive latent variable model. *Intelligence*, *69*, 8–15. doi:10.1016/j.intell.2018.03.011
- Zhang, H., Zhang, X., He, Y., & Shi, J. (2016). Inattentive Blindness in 9- to 10-Year-Old Intellectually Gifted Children. *Gifted Child Quarterly*, *60*, 287–295. doi:10.1177/0016986216657158
- Ziegler, A., & Raul, T. (2010). Myth and Reality: A review of empirical studies on giftedness. *High Ability Studies*, *11*, 113–136. doi:10.1080/13598130020001188