



**HAL**  
open science

# Déficits de mémoire de travail et de mémoire à court terme dans la dyslexie : évaluation et remédiation

Sarah Wokuri

► **To cite this version:**

Sarah Wokuri. Défis de mémoire de travail et de mémoire à court terme dans la dyslexie : évaluation et remédiation. Psychologie. Université Rennes 2, 2024. Français. NNT : 2024REN20002 . tel-04516414

**HAL Id: tel-04516414**

**<https://theses.hal.science/tel-04516414v1>**

Submitted on 22 Mar 2024

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

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

# THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE RENNES 2

ECOLE DOCTORALE N° 646

*Education, Langues, Interactions, Cognition, Clinique, Expertise*

Spécialité : *Psychologie*

Par

**Sarah WOKURI**

## **Déficits de mémoire de travail et de mémoire à court terme dans la dyslexie : évaluation et remédiation**

**Thèse présentée et soutenue à Rennes le 25 janvier 2024**

**Unité de recherche : Laboratoire de Psychologie : Cognition, Comportement, Communication**

### **Rapporteurs avant soutenance:**

Arnaud ROY                      Professeur des Universités, Université d'Angers

Pauline QUÉMART            Maître de conférences HDR, Université de Nantes

### **Composition du Jury :**

Examineurs : Hélène DELAGE

Alessandro GUIDA

Maître d'Enseignement et de Recherche, Université de Genève

Maître de conférences, Université Rennes 2

Dir. de thèse : Nathalie MAREC-BRETON

Steve MAJERUS

Professeure des Universités, Université Rennes 2

Professeur, Université de Liège

# Thèse de doctorat de

L'UNIVERSITE RENNES 2

ECOLE DOCTORALE N° 646

*Education, Langages, Interactions, Cognition, Clinique, Expertise*

Spécialité : *Psychologie*

## **Déficits de mémoire de travail et de mémoire à court terme dans la dyslexie : évaluation et remédiation**

Présentée par

**Sarah WOKURI**

Date de soutenance : 25 janvier 2024

### **Composition du Jury :**

Arnaud ROY

Professeur des universités, Université d'Angers (Rapporteur)

Pauline QUÉMART

Maître de conférences HDR, Université de Nantes (Rapporteur)

Hélène DELAGE

Maître d'Enseignement et de Recherche, Université de Genève (Examinatrice)

Alessandro GUIDA

Maître de conférences, Université Rennes 2 (Examineur)

Nathalie MAREC-BRETON

Professeure des universités, Université Rennes 2 (Directrice de thèse)

Steve MAJERUS

Professeur des université, Université de Liège (Directeur de thèse)



## REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu aboutir sans la participation, l'aide et le soutien de nombreuses personnes, que je tiens à remercier sincèrement.

Je remercie mes directeurs de thèse pour leur accompagnement tout au long de ce projet. Nathalie Marec-Breton, pour la confiance qu'elle m'a accordée et son accueil chaleureux au sein du LP3C. Je la remercie également pour son aide lors de l'enregistrement vidéo des supports du matériel de remédiation. Steve Majerus, pour ses conseils avisés qui ont grandement contribué à ma formation dans le domaine de la recherche scientifique. Je suis également reconnaissante pour ses relectures constructives et sa grande disponibilité.

Je remercie les membres du jury, Arnaud Roy, Pauline Quémart, Hélène Delage, Alessandro Guida, de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail.

Mes remerciements s'adressent tout particulièrement aux enfants et à leur famille, pour leur investissement et leur disponibilité durant les différentes étapes du projet. Je remercie également Delphine Heurtaux (coordinatrice de l'Ulis TSL du collège Montesquieu au Havre) et Florence Tissot (principale adjointe du collège Georges Brassens du Rheu) pour leur aide dans le recrutement des participants.

Je tiens aussi à remercier Corentin Gonthier pour sa contribution à l'analyse statistique des données. Je le remercie pour sa disponibilité et la pédagogie dont il a fait preuve pour répondre à mes questionnements.

Merci à Sabrina Chevalier, étudiante en master de psychologie pour sa rigueur et son aide dans le recrutement d'enfants « contrôles ».

Je remercie l'entreprise « dynamixyz » pour avoir mis à disposition ses locaux et son matériel pour l'enregistrement vidéo des supports du matériel de remédiation.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes anciens collègues du SESSAD troubles spécifiques du langage et des apprentissages du Havre, qui ont soutenu et enrichi mes questionnements cliniques à l'initiative de mon investissement dans ce projet de thèse.

Je remercie, Salomé, Fanny, Mélissa et Vanina, anciennes doctorantes au LP3C, pour leur bonne humeur quotidienne et la richesse de nos échanges.

Merci à mes amis pour leur précieux soutien, en particulier à Chloé et Lauren, pour leur présence dans les périodes les plus importantes et difficiles.

Merci à ma famille pour ses encouragements. Merci en particulier à mon frère, pour m'avoir ouvert le champ des possibles en m'incitant à oser m'engager dans ce projet qui me passionnait et en me soutenant dans les moments les plus difficiles.

Merci enfin à Gaëtan pour son soutien déterminant et sa patience, les nombreux compromis et la résilience qu'il m'a transmise dans les moments de découragement.

# Table des matières

<b>Avant-propos .....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCTION THEORIQUE.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapitre 1 : La dyslexie développementale.....</b>	<b>11</b>
1. Définition et classifications .....	11
2. Les déficits phonologiques et métaphonologiques.....	15
3. Les relations entre les troubles phonologiques et les déficits de MT dans la dyslexie.....	19
3.1. Les déficits de MT dans la dyslexie.....	19
3.2. Implication de la MT dans les tâches de conscience phonologique .....	20
3.3. Du trouble des représentations phonologiques au trouble d'accès phonologique.....	21
3.4. Le déficit dans les tâches de conscience phonologique et de MT : une interprétation univoque ?.....	23
<b>Chapitre 2 : La mémoire de travail et ses déficits dans la dyslexie .....</b>	<b>25</b>
1. Les différents déterminants de la MT verbale .....	25
1.1. La boucle phonologique du modèle de Baddeley .....	25
1.2. L'influence des représentations sémantiques et phonologiques en MLT.....	26
1.3. Les aspects sériels de la MT.....	28
1.4. Le contrôle attentionnel en MT.....	30
2. La distinction entre MT de l'item et MT de l'ordre sériel dans la dyslexie .....	34
2.1. La distinction et l'évaluation de la MT de l'item et de l'ordre sériel.....	34
2.2. MT de l'item et de l'ordre sériel dans l'apprentissage du langage écrit.....	36
2.3. MT de l'item et de l'ordre sériel dans la dyslexie.....	37
3. Les déficits attentionnels dans la dyslexie .....	40
<b>Chapitre 3 : La remédiation des déficits de mémoire de travail .....</b>	<b>43</b>
1. L'approche fonctionnelle.....	43
2. L'approche cognitive .....	49
2.1. La remédiation de la MT de l'item .....	51
2.2. La remédiation de la MT de l'ordre sériel .....	54
2.3. La remédiation du contrôle attentionnel en MT.....	55
3. La remédiation de la mémoire de travail dans la dyslexie .....	56
<b>PARTIE EXPERIMENTALE ET CLINIQUE .....</b>	<b>59</b>
Objectifs et hypothèses.....	59

<b>ETUDE 1: Heterogeneity of short-term memory deficits in children with dyslexia .....</b>	<b>65</b>
1. Introduction.....	65
2. Method.....	70
3. Results.....	78
4. Discussion.....	87
<b>ETUDE 2: The independence of attentional control and working memory deficits in children with dyslexia.....</b>	<b>95</b>
1. Introduction.....	95
2. Method.....	100
3. Results.....	106
4. Discussion.....	111
<b>ETUDE 3 : Remédiation ciblée de la mémoire de travail dans la dyslexie : étude pilote de cas multiples.....</b>	<b>117</b>
1. Introduction.....	117
2. Méthode.....	122
3. Résultats.....	128
4. Discussion.....	134
<b>DISCUSSION GENERALE .....</b>	<b>139</b>
1. Synthèse des résultats.....	139
2. Fonctionnement de la MT dans la dyslexie : nature et spécificité des déficits.....	141
2.1 Nature des déficits de MT .....	141
2.2 Troubles attentionnels et lien avec la MT .....	149
3. L’approche cognitive pour la remédiation de la MT dans la dyslexie.....	151
3.2 Quelle efficacité potentielle d’une remédiation ciblée de la MT chez des enfants et adolescents dyslexiques ? .....	152
3.3 L’implication de facteurs non cognitifs ?.....	157
4. Implications cliniques.....	159
5. Limites et perspectives de recherche.....	160
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>163</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>165</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>189</b>
Annexe 1 : Descriptifs des tâches d’évaluation des compétences phonologiques et de la mémoire de travail.....	189
Annexe 2 : Procédures détaillées de la remédiation de la mémoire de travail de l’ordre sériel initialement prévue en présentiel.....	192



Annexe 3 : Procédures détaillées de la remédiation de la mémoire de travail de l’item phonologique initialement prévue en présentiel.....	195
Annexe 4 : Adaptations des tâches d’évaluation pour les lignes de base à distance (étude 3).....	199



## Avant-propos

La dyslexie concernerait environ 5% de la population (Expertise collective de L'INSERM, 2007) et constitue une cause de handicap qui est davantage reconnue depuis la loi du 11 février 2005 relative à la scolarisation des enfants en situation de handicap. Même si plusieurs théories explicatives de la dyslexie ont été proposées, certaines données de la littérature soutiennent que ce trouble neurodéveloppemental est associé à de multiples déficits cognitifs (Pennignton, 2006). Cette approche est davantage compatible avec l'hétérogénéité cognitive des enfants dyslexiques observée sur le plan clinique. Cela implique une approche pluridisciplinaire dans laquelle orthophonistes et neuropsychologues travaillent en étroite collaboration.

Dans les services de soins qui accompagnent des enfants et adolescents dyslexiques, le neuropsychologue a souvent pour mission l'évaluation et la prise en charge des troubles cognitifs. Des déficits de mémoire de travail ont déjà été observés dans la dyslexie (Menghini et al., 2011; Szenkovits & Ramus, 2005; Varvara et al., 2014). En revanche, en raison des multiples déterminants de la mémoire de travail, l'interprétation de ces déficits chez les personnes dyslexiques reste complexe. Le premier objectif de ce travail de thèse est donc de préciser la nature des déficits de mémoire de travail chez les enfants dyslexiques.

Concernant la prise en charge des troubles cognitifs des enfants dyslexiques, le neuropsychologue est souvent sollicité par les familles et les autres professionnels de santé pour une remédiation des déficits de mémoire de travail. Dans ce contexte, le clinicien s'appuie sur les principes de l'Evidence-Based Practice en se basant sur différentes sources d'informations : les données scientifiques, les caractéristiques et préférences du patient, l'expertise clinique du clinicien ainsi que le contexte sociétal et environnemental (Howick, 2011). Toutefois, la prise de décision concernant la mise en place d'une intervention ciblant la mémoire de travail chez les enfants dyslexiques est complexe, notamment en raison d'un manque de données scientifiques disponibles sur la remédiation de ces déficits dans cette population. Cela conduit le clinicien à s'appuyer également sur des résultats obtenus auprès de patients qui présentent des caractéristiques très différentes des enfants dyslexiques (âge, diagnostic, contexte culturel, nature du déficit de mémoire de travail). Ainsi, le

neuropsychologue peut parfois être confronté à des sources d'informations contradictoires. L'exploration de l'efficacité d'une remédiation de la mémoire de travail dans la dyslexie constitue donc un enjeu important. D'une part, comme la mémoire de travail est corrélée avec la réussite scolaire (Alloway & Alloway, 2010), le développement de remédiations efficaces des déficits de mémoire de travail pourrait soutenir les enfants dyslexiques dans leur scolarité. D'autre part, il semble primordial d'évaluer si un entraînement de la mémoire de travail présente un réel intérêt pour ces enfants, afin d'éviter de les mobiliser pour des interventions thérapeutiques inefficaces. Le second objectif de cette thèse est donc d'explorer la potentielle efficacité d'une remédiation de la mémoire de travail chez les enfants dyslexiques.

La première partie de la thèse consistera en une partie théorique structurée en trois chapitres. Le chapitre 1 présentera la dyslexie développementale et les troubles phonologiques pouvant y être associés. Le chapitre 2 se focalisera sur les déficits de mémoire de travail dans la dyslexie. Les différents déterminants de la mémoire de travail seront présentés avant d'aborder les déficits spécifiques observés chez les personnes dyslexiques. Dans le chapitre 3, nous verrons qu'il existe différentes approches pour la remédiation de la mémoire de travail et nous étudierons les données scientifiques concernant leur efficacité. Les études menées auprès de personnes dyslexiques seront également présentées.

La seconde partie de la thèse sera consacrée à la partie expérimentale structurée en trois études menées auprès d'enfants dyslexiques. Dans la première étude, nous nous intéresserons au fonctionnement de la mémoire de travail de l'item et de l'ordre sériel en explorant leurs relations avec les habiletés phonologiques dans la dyslexie. Nous étudierons également les différences inter-individuelles concernant les déficits de mémoire de travail des enfants dyslexiques. La seconde étude, examinera certains processus attentionnels ainsi que leurs interactions avec les capacités de mémoire de travail des enfants dyslexiques. La dernière étude explorera la potentielle efficacité d'une remédiation ciblée des déficits de mémoire de travail de l'item et de l'ordre sériel chez des adolescents dyslexiques.

Pour conclure cette thèse, nous proposerons une discussion générale des résultats obtenus et de leurs implications théoriques et cliniques.

# INTRODUCTION THEORIQUE

## Chapitre 1 : La dyslexie développementale

Certains aspects de ce chapitre ont fait l'objet d'une publication :

Wokuri, S., & Marec-Breton, N. (2018). Mémoire de travail et troubles phonologiques chez le dyslexique. *Revue de Neuropsychologie*, Volume 10(4), 269–278. <https://doi.org/10.1684/nrp.2018.0474>

### 1. Définition et classifications

Pour Lyon et al. (2003) la dyslexie est un trouble spécifique de l'apprentissage de la lecture, avec des difficultés persistantes dans la reconnaissance exacte et/ou fluente de mots écrits, le décodage de séquence de lettres ainsi que pour la transcription orthographique correcte de mots. Ces difficultés résultent d'un déficit phonologique et sont souvent inattendues au regard des autres capacités cognitives des personnes dyslexiques et de l'enseignement adéquat qui était proposé. De plus, ce trouble neurodéveloppemental a une origine génétique et une base neurobiologique (Norton et al., 2015). Les conséquences secondaires de ce trouble spécifique peuvent concerner des problèmes dans la compréhension en lecture. Par ailleurs, l'expérience réduite dans la lecture pourrait limiter l'accroissement du vocabulaire de l'enfant et le développement de ses connaissances générales.

Pour l'Association Américaine de psychiatrie (2013), la dyslexie développementale s'intègre dans le diagnostic unique et global de « trouble spécifique des apprentissages ». Même si le DSM-5 distingue la production orthographique de la lecture, il définit la dyslexie sous le terme de « troubles spécifiques des apprentissages, avec déficit de la lecture et avec déficit de l'expression écrite » et propose les critères diagnostiques suivants :

**A.** Difficultés à apprendre et à utiliser des compétences scolaires ou universitaires, comme en témoigne la présence d'au moins un des symptômes suivants ayant persisté pendant au moins 6 mois, malgré la mise en place de mesures ciblant ces difficultés :

1. Lecture des mots inexacte ou lente et réalisée péniblement (p. ex. lit des mots isolés à voix haute de manière incorrecte ou lentement et avec hésitation, devine souvent des mots, a des difficultés de prononciation).

2. Difficultés à comprendre le sens de ce qui est lu (p. ex. peut lire un texte correctement mais ne pas comprendre l'ordre, les relations, les déductions ou les significations plus profondes de ce qui est lu).

3. Difficultés à épeler (p. ex. peut ajouter, oublier ou substituer des voyelles ou des consonnes).

4. Difficultés d'expression écrite (p. ex. fait de multiples erreurs grammaticales ou de ponctuation au sein des phrases ; construit mal les paragraphes ; l'expression écrite des idées manque de clarté).

**B.** Les compétences scolaires ou universitaires perturbées sont nettement au-dessous du niveau escompté pour l'âge chronologique du sujet, et ce de manière quantifiable. Cela interfère de façon significative avec les performances scolaires, universitaires ou professionnelles, ou avec les activités de la vie courante, comme le confirment des tests de niveau standardisés administrés individuellement ainsi qu'une évaluation clinique complète. Pour les individus âgés de 17 ans et plus, des antécédents avérés de difficultés d'apprentissages perturbantes peuvent se substituer à une évaluation standardisée.

**C.** Les difficultés d'apprentissage débutent au cours de la scolarité mais peuvent ne pas se manifester entièrement tant que les demandes concernant ces compétences scolaires ou universitaires altérées ne dépassent pas les capacités limitées du sujet (p. ex. lors d'examens chronométrés, de la lecture ou de la rédaction de rapports longs et complexes dans un délai bref, d'une charge de travail intellectuel excessivement lourde).

**D.** Les difficultés d'apprentissage ne sont pas mieux expliquées par un handicap intellectuel, des troubles non corrigés de l'acuité visuelle ou auditive, d'autres troubles neurologiques ou mentaux, une adversité psychosociale, un manque de maîtrise de la langue de l'enseignement scolaire ou universitaire ou un enseignement pédagogique inadéquat.

Pour Mazeau & Pouhet, (2014), il est ainsi possible de parler de dyslexie lorsque que la performance de l'enfant en lecture est durablement et significativement faible au regard de

son âge et d'un enseignement adéquat du langage écrit, mais également en dépit d'un fonctionnement intellectuel dans la moyenne et de difficultés non imputables à un trouble sensoriel, neurologique ou à des carences éducatives.

Concernant le critère de persistance des difficultés pendant 6 mois malgré une remédiation adaptée (critère A), cela signifie qu'en dépit des progrès d'un enfant dyslexique en lecture et en orthographe, ses performances dans ces domaines restent significativement inférieures à celles des sujets du même âge chronologique. En France, les difficultés de langage écrit sont généralement prises en charge par les orthophonistes, même s'il est possible que certains enseignants proposent des interventions ponctuelles pour les élèves qui présentent un retard dans l'apprentissage de la lecture. Dans ce contexte, le diagnostic de dyslexie devrait donc être établi seulement si l'enfant avec des difficultés de lecture a bénéficié d'une prise en charge orthophonique régulière pendant au moins 6 mois. Ce critère de persistance des difficultés permet ainsi de distinguer les enfants qui présentent un simple retard dans l'apprentissage de la lecture des enfants présentant un trouble plus durable et évocateur d'une dyslexie.

Trois grandes catégories de dyslexies développementales ont été établies sur la base des dyslexies acquises et en référence au modèle à deux voix (Coltheart et al., 2001; Manis et al., 1996). La dyslexie phonologique est caractérisée par des difficultés concernant la voie d'assemblage (voie phonologique/codage phonologique) impliquée dans la lecture des mots nouveaux ou peu fréquents tandis que la lecture de mots irréguliers est préservée. La seconde forme de dyslexie est souvent appelée « dyslexie de surface ». Elle se caractérise par l'utilisation exclusive de la voie d'assemblage grapho-phonémiques en raison des difficultés à s'appuyer sur la procédure lexicale de lecture (voie orthographique/accès lexicale) qui entravent la lecture de mots irréguliers. La dyslexie mixte correspond au troisième type de dyslexie avec des difficultés d'installation des voies d'assemblage et d'adressage. Toutefois, cette classification des sous-types de dyslexie sur la base de leur profil de lecture ne fait pas consensus dans la littérature et d'autres auteurs proposent plutôt de s'appuyer sur le type de déficit cognitif sous-jacent, en distinguant les troubles phonologiques des troubles visuo-attentionnel (Bosse & Valdois, 2003; Zoubrinetzky et al., 2014). De plus, certains auteurs considèrent que les dyslexies de surface reflètent davantage un retard dans l'enrichissement du stock orthographique consécutif à un manque de pratique de la lecture (Poncelet, 2020).

Au-delà des trois grandes catégories, le déficit central de la dyslexie est un sujet de vive controverse (Ramus, 2001). Il existe plusieurs théories concernant l'origine de la dyslexie : la théorie phonologique, la théorie du traitement auditif temporel, la théorie magnocellulaire visuelle, la théorie cérébelleuse et la théorie magnocellulaire générale (Poncelet, 2020).

Afin de mieux comprendre les comorbidités associées aux troubles de la lecture, Pennington (2006) a proposé un modèle de déficits cognitifs multiples des troubles du développement, contrastant ainsi avec les modèles de déficit cognitif unique à l'origine de la dyslexie. En effet, Pennington considère que l'origine de la dyslexie est multifactorielle et rejette les modèles de déficit cognitif unique à l'origine des troubles du développement pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les troubles du développement comme la dyslexie sont caractérisés par des symptômes (troubles de la lecture) qui n'ont pas de causes uniques sur le plan étiologique ou concernant les mécanismes cognitifs sous-jacents. Deuxièmement, il existe une comorbidité importante entre la dyslexie et le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité, en lien avec des facteurs de risque génétiques et cognitifs communs. Troisièmement, le principe de double dissociation présente des limites dans le cadre des troubles du développement. Dans son modèle, Pennington (2006) propose que l'étiologie des troubles du développement soit multifactorielle, en impliquant l'interaction de multiples facteurs de risque et de protection de nature génétique ou environnementale. Ce serait ses facteurs de risque et de protection qui altèreraient le développement de certaines fonctions cognitives, produisant ainsi les symptômes comportementaux spécifiques qui caractérisent les troubles du développement, en l'occurrence, les difficultés de lecture dans le cas de la dyslexie. Ainsi, aucun facteur étiologique unique ne serait suffisant pour expliquer un trouble du développement car plusieurs facteurs seraient nécessaires. Le modèle de Pennington permet ainsi d'envisager la dyslexie comme un trouble du neurodéveloppement dans lequel les difficultés d'apprentissage du langage écrit peuvent être sous tendus par plusieurs déficits cognitifs. Pennington et al. (2012) ont testé cinq modèles différents pouvant conduire à une dyslexie, avec deux modèles à déficit unique (déficit phonologique unique ; sous-types de déficit unique), deux modèles à déficits multiples (déficit central phonologique avec déficits multiples ; déficits multiples) et un modèle hybride englobant les quatre possibilités précédentes. Les capacités cognitives mesurées dans cette étude étaient la conscience phonologique, les compétences linguistiques et la vitesse de traitement et/ou la vitesse de



dénomination dans deux grands échantillons d'enfants. Les auteurs ont constaté que même si 40 % des cas de dyslexie de ces échantillons ne présentaient pas de déficits compatibles avec les différents modèles, le modèle hybride était celui qui correspondait le mieux aux données. Cela indique qu'il existe plusieurs trajectoires possibles pour développer une dyslexie, certaines impliquant des déficits uniques et d'autres des déficits multiples. En outre, bien que l'hypothèse du déficit phonologique reste l'une des plus influentes dans la recherche sur la dyslexie, les problèmes phonologiques doivent interagir avec d'autres troubles cognitifs pour aboutir à une incapacité de lecture (Peterson & Pennington, 2012).

## **2. Les déficits phonologiques et métaphonologiques**

Bien que certains auteurs considèrent que différents troubles cognitifs peuvent être à l'origine de la dyslexie, de nombreux travaux de recherche ont exploré la théorie phonologique (Jucla, 2014). Dans ce contexte, de nombreuses interventions visant les habiletés phonologiques ont été développées pour les personnes avec une dyslexie (pour une présentation des outils francophones, voir Poncelet, 2020). Pour Colé & Sprenger-Charolles (2021), la seule théorie qui permet de rendre compte du plus grand nombre de cas de dyslexie et d'expliquer l'origine de les troubles de la lecture associés est la théorie phonologique. Cette théorie considère que la capacité à établir des liens entre les représentations mentales des phonèmes et des lettres est indispensable pour l'apprentissage d'un système alphabétique. Ainsi, une perturbation des représentations des phonèmes limiterait l'apprentissage de la correspondance graphèmes-phonèmes. Selon cette hypothèse phonologique, la dyslexie est sous-tendue par un dysfonctionnement au niveau des représentations phonologiques. Pour Goswami (2000), les dyslexiques ont des difficultés dans la représentation segmentale de la structure phonologique des mots. L'implication du traitement phonologique dans le développement de la lecture et la dyslexie est largement soutenue (Melby-Lervåg et al., 2012 ; Snowling & Melby-Lervåg, 2016 ; Mengisidou & Marshall, 2019 ; Snowling et al., 2018). Des déficits de dénomination rapide ont également été mis en évidence chez des personnes dyslexiques lorsqu'il s'agit de dénommer le plus rapidement possible des items très fréquents comme des objets, des couleurs (Hulme et Snowling, 2013). Ces tâches évaluent l'accès au lexique et plus particulièrement la récupération rapide en mémoire à long terme de la forme orale d'un mot à partir de sa représentation imagée.

Concernant les données en neuro-imagerie, les revues de littérature et les méta-analyses menées dans le cadre de la théorie phonologique ont identifié chez les dyslexiques une sous-activation des régions temporo-pariétales postérieures impliquées dans la conversion graphèmes-phonèmes et le codage phonologique des mots, ainsi qu'une sous-activation des régions occipito-temporales associées au traitement visuo-orthographique des mots lus (Richlan, 2012, 2014 ; Richlan et al., 2009, 2011, 2013).

Le traitement phonologique implique un ensemble de processus cognitifs différents, allant de la perception de la parole à des processus métacognitifs tels que la conscience phonologique (Loucas et al., 2016). En ce qui concerne la conscience phonologique, il s'agit d'un des facteurs les plus associés à l'acquisition de la lecture et à ses troubles (Castles & Coltheart, 2004). La conscience phonologique est définie comme étant la capacité à identifier les composants phonologiques des unités linguistiques (phonèmes, syllabes, rimes) et de les manipuler de façon délibérée (Demont et Gombert, 2007). Ces habiletés sont également désignées par les termes de « compétences métaphonologiques » correspondant aux activités de réflexion et de manipulation du langage planifiées et contrôlées par le sujet. La conscience des unités les plus larges telles que les syllabes et les rimes apparaît chez les enfants pré-lecteurs, tandis que la conscience des unités plus petites telles que les phonèmes se développe plus tardivement conjointement avec l'apprentissage de la lecture (Goswami, 2008; Ziegler & Goswami, 2005). Une revue de littérature (Castles & Coltheart, 2004) a montré que la capacité à analyser des unités phonologiques plus large que les phonèmes (syllabes/rimes) avait une valeur prédictive plus faible pour l'apprentissage de la lecture. Une méta-analyse (Melby-Lervåg et al., 2012) a également montré que la conscience phonémique était plus corrélée avec les différences individuelles dans l'apprentissage de la lecture que la conscience de la rime. Par ailleurs, la conscience phonologique serait davantage corrélée avec la lecture de pseudo-mots correspondant aux capacités de recodage phonologique, qu'avec la lecture de mots irréguliers correspondant au processus d'accès lexical (Manis, Doi, & Bhadha, 2000; Nilsen & Bourassa, 2008).

Des études ont également montré une implication des habiletés phonologiques dans les troubles du langage écrit, en utilisant des analyses de corrélation et de régression afin d'explorer les facteurs associés au niveau de lecture des personnes dyslexiques (Ramus et al., 2003; Ramus, Rosen, et al., 2003; White et al., 2006). Ramus et al. (2003) ont étudié les

compétences phonologiques chez des enfants dyslexiques en utilisant des tâches de contrepèterie, une tâche d'identification de phonèmes et de rimes et une tâche de dénomination rapide. Les chercheurs ont ainsi observé que le niveau de lecture de mots était significativement corrélé avec le facteur phonologique issu des tâches phonologiques qu'ils avaient utilisées.

Demont et Gombert (2007) différencient trois types d'épreuves se distinguant considérablement quant à leurs exigences cognitives, mnésiques et linguistiques : les épreuves de classification, les épreuves de dénombrement et de segmentation et les épreuves de manipulation. Les épreuves de classifications consistent à demander au sujet de classer une série d'items selon un critère phonologique (par exemple, le fait de commencer par le même phonème). Martinez Perez et al. (2012) ont montré que des jeunes dyslexiques rencontraient des difficultés dans la réalisation d'une tâche de discrimination phonologique pour déterminer si deux syllabes présentées oralement étaient identiques. Nithart et al. (2009) ont également observé que des enfants dyslexiques présentaient des difficultés dans une épreuve de jugement de syllabes commune par rapport à des enfants de même âge chronologique. En revanche, il n'y avait aucune difficulté pour le jugement de phonèmes communs en comparaison à un groupe contrôle apparié en âge chronologique et à un groupe contrôle de même niveau de lecture. Pour les adultes avec une dyslexie, les déficits dans les tâches de catégorisation ne sont pas systématiques. En effet, dans des tâches de discrimination phonologique, des adultes dyslexiques ont montré des performances similaires au groupe contrôle apparié au niveau de l'âge chronologique, du QI non verbal et du niveau académique (Ramus, 2003; Soroli et al., 2010).

Pour les tâches de dénombrement et de segmentation phonologique, les résultats confortent des déficits contrastés en fonction de l'âge des personnes avec une dyslexie. Auprès d'enfants dyslexiques, Trolès (2010) a observé des difficultés de segmentation phonémique lorsqu'il s'agit de décomposer en phonèmes les mots présentés oralement. Cependant, il a été observé des performances normales dans des tâches de segmentation de phonèmes chez les adultes dyslexiques (Sela et al., 2012).

Les épreuves de manipulation consistent à la réalisation d'une transformation syllabique ou phonémique de mots. Les tâches de contrepèteries et de suppression de phonèmes sont

très souvent utilisées. Dans les tâches de suppression de phonème, les personnes doivent supprimer un des phonèmes constitutifs d'un mot donné oralement en fonction d'un critère (par exemple : phonème initial ou final). Dans les contrepèteries, il est demandé aux participants d'inverser les deux premiers phonèmes de deux mots donnés oralement. Par exemple, pour les mots « gâteau / mouton », la réponse correcte est « mateau / gouton ». Plusieurs études ont montré que des enfants dyslexiques avaient des déficits dans les épreuves de suppression de phonèmes ainsi que dans les épreuves de contrepèteries, par rapport à des enfants de même âge chronologique (Ramus, Pidgeon, et al., 2003; Ramus, Marshall, Rosen, & van der Lely, 2013), mais également en comparaison à des enfants avec le même âge de lecture (Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012). Ces déficits ont été répliqués chez des adultes dyslexiques en comparaison à des groupes contrôle appariés au niveau de l'âge et du QI non verbale (De Carvalho et al., 2014; Nergård-Nilssen & Hulme, 2014; Ramus, Rosen, et al., 2003; Soroli et al., 2010). Toutefois, Sela et al. (2012) n'ont pas observé de difficultés significatives chez des adultes dyslexiques dans une tâche de suppression de phonèmes.

Dans les évaluations cliniques, les faibles performances des dyslexiques dans les tâches métaphonologiques sont souvent considérées comme étant un indicateur fiable pour évoquer le diagnostic de dyslexie. Les difficultés dans ce type de tâches concerneraient davantage les personnes avec une dyslexie phonologique ou une dyslexie mixte. Des déficits de mémoire de travail (MT) verbale seraient également observés dans ces deux types de dyslexie.

Cependant, les déficits phonologiques ne sont pas nécessairement limités à la dyslexie. McArthur et al. (2000) ont montré que la comorbidité entre le trouble développemental du langage (TDL) et la dyslexie était fréquente (près de 50 %), avec des déficits de conscience phonologique dans les deux cas (De Groot et al., 2015). Parallèlement, certaines études ont montré que les déficits de conscience phonologique étaient plus fortement associés à la dyslexie qu'au TDL (Catts et al., 2005 ; Spanoudis et al., 2019). McArthur et Castles (2013) ont observé que les enfants dyslexiques présentaient un déficit de discrimination phonologique et de conscience phonologique, contrairement aux enfants présentant uniquement un TDL. Nithart et al. (2009) ont, par ailleurs, observé une altération de la conscience phonologique à la fois chez des enfants dyslexiques et chez des enfants avec un TDL. En revanche, un déficit

de perception de la parole dans une tâche de discrimination phonémique était relevé uniquement chez les enfants avec un TDL.

Ainsi, des déficits sur les tâches de dénomination rapide, de conscience phonologique, de discrimination phonémique et de MT verbale ont fréquemment été observés chez les personnes dyslexiques. Si ces données soutiennent l'hypothèse phonologique, plusieurs travaux ont été menés afin de préciser la nature des troubles phonologiques des personnes avec une dyslexie.

### **3. Les relations entre les troubles phonologiques et les déficits de MT dans la dyslexie**

Dans la littérature, une distinction est souvent faite entre la mémoire à court terme qui renvoie au stockage passif des informations et la MT qui renvoie au traitement et à la manipulation de l'information stockée en mémoire à court terme en s'appuyant davantage sur les capacités attentionnelles et exécutives. Il est, cependant, largement admis que la rétention à court terme s'appuie également sur des mécanismes de contrôle attentionnel (Cowan, 2022). C'est pourquoi, nous utiliserons dans cette introduction le terme de MT pour désigner l'ensemble des processus impliqués dans le maintien temporaire des informations et/ou dans leur manipulation et leur traitement.

#### **3.1. Les déficits de MT dans la dyslexie**

Des déficits de MT verbale ont fréquemment été mis en évidence chez les personnes dyslexiques. Plusieurs études ont montré un déficit de stockage d'informations verbales en MT chez des enfants et des adultes dyslexiques, dans des tâches d'empan de chiffres endroits (Jeffries & Everatt, 2004; Sela et al., 2012), de rappel sériel immédiat de mots (Menghini et al., 2011; Szenkovits & Ramus, 2005; Varvara et al., 2014a) et de non-mots (Menghini et al., 2011; Szenkovits & Ramus, 2005; Tiffin-Richards et al., 2008). D'autres études ont utilisé des tâches d'empans de chiffres envers afin d'évaluer la capacité à stocker et à manipuler simultanément des informations verbales en MT. Certains résultats ont montré un déficit de MT dans ce type de tâches chez les personnes dyslexiques (Jeffries & Everatt, 2004; Reiter et al., 2005; Sela et

al., 2012; Tiffin-Richards et al., 2008) tandis que d'autres résultats ont rapporté une préservation des capacités (Demont & Botzung, 2003; Kibby et al., 2004).

Les déficits de MT des personnes avec une dyslexie sont souvent considérés comme étant la conséquence des déficits de traitement phonologique qui caractérise la dyslexie (Kibby, 2009). De plus, certaines données empiriques suggèrent que la MT est efficace chez les personnes dyslexiques en modalité visuelle et visuo-spatiale (Garcia et al., 2014; Hachmann et al., 2014; Jeffries & Everatt, 2004; Kibby et al., 2004; Smith-Spark & Fisk, 2007). Pour Alegria (2004), comme le maintien d'informations verbales en MT repose sur des codes phonologiques, il est cohérent que les difficultés d'accès aux codes phonologiques des personnes dyslexiques entraînent un déficit en MT.

Gray et al. (2019) ont étudié les performances de MT chez des enfants dyslexiques en proposant treize tâches évaluant les différents modules du modèle de Baddeley (1974) et de Cowan (2000) tels que l'administrateur central, le focus attentionnel, le calepin visuo-spatial et la boucle phonologique. Leurs résultats ont montré que 24% des enfants avec une dyslexie présentaient de faibles performances sur l'ensemble des tâches de MT et que 15% montraient des performances dans la moyenne excepté pour une tâche de mise à jour de nombre évaluant l'administrateur central. Par ailleurs, la fréquence des faibles performances de MT était plus élevée chez les enfants qui présentaient une dyslexie associée à un TDL (66%). Une autre étude a montré au sein d'un groupe d'enfants dyslexiques que 42,2 % des enfants présentaient un déficit de MT phonologique sur des tâches d'empans de chiffres et de répétition de non-mots (Mundy & Hannant, 2020).

### **3.2. Implication de la MT dans les tâches de conscience phonologique**

Pour Demont et Botzung (2003), la conscience phonologique joue un rôle déterminant dans l'apprentissage de la lecture mais s'appuie aussi sur le développement des capacités de stockage temporaire de l'information verbale au niveau de la boucle phonologique. Ces auteurs ont montré que les performances à des tâches de suppression phonémique et de détection d'intrus phonologique étaient corrélées aux performances à des épreuves d'empans de mots chez des enfants dyslexiques. Certaines épreuves de conscience phonologique comme les tâches de suppression phonémique et de détection d'intrus requièrent donc des

capacités de MT verbale car elles nécessitent un maintien en mémoire des stimuli pendant leur traitement. Pour Varvara et al. (2014), les épreuves de contrepèteries, mobilisent également des capacités de MT. Ainsi, les tâches de conscience phonologique qui nécessitent la manipulation d'unités phonologiques mobiliseraient également les capacités de MT.

Pour Ramus et Szenkovits (2008) il est probable que les erreurs observées chez les personnes dyslexiques dans les épreuves de métaphonologie soient en lien avec la charge de MT des tâches proposées. Soroli et al. (2010) ont donc étudié l'influence de la charge mnésique dans les tâches phonologiques sur les performances des dyslexiques. Chez des adultes dyslexiques, les auteurs ont évalué la discrimination et la répétition de pseudo-mots en faisant varier la charge en MT de ces tâches. Pour cela, il était demandé aux participants de comparer ou de répéter des listes de pseudo-mots d'une longueur croissante. Les résultats ont montré que les adultes dyslexiques ne se distinguaient pas des adultes contrôles lorsque la charge mnésique était faible. En revanche, le groupe d'adultes dyslexiques montraient des difficultés sur les épreuves phonologiques à partir des séquences de trois items lorsque la charge en MT de la tâche était plus élevée.

### **3.3. Du trouble des représentations phonologiques au trouble d'accès phonologique**

La variabilité des troubles phonologiques chez les dyslexiques ainsi que l'implication de la MT dans les tâches de conscience phonologique ont conduit Ramus et al. (2013) à distinguer deux types de déficits phonologiques.

Le premier type de déficit phonologique correspond à un trouble au niveau des représentations phonologiques. Il peut être observé dans des épreuves phonologiques de perception catégorielle et de production telles que la discrimination catégorielle et la répétition simple de non-mots. La perception catégorielle renvoie au phénomène par lequel les différences acoustiques entre les sons de la parole ne sont pas perceptibles sauf s'ils appartiennent à des catégories phonétiques différentes (Liberman et al., 1957).

Le deuxième type de déficit phonologique correspond à un trouble d'accès aux représentations phonologiques. Ce type de trouble renvoie aux difficultés relevées dans les tâches de conscience phonologique, de dénomination rapide et de MT verbale. Ces épreuves phonologiques mobilisent aussi les représentations phonologiques, mais nécessitent

également des capacités cognitives supplémentaires telles que la métacognition, la MT, ou la récupération rapide et sérielle des informations en mémoire à long terme (MLT). Cette classification est distincte de celle de Demont et Gombert (2007) car elle différencie les capacités perceptives phonologiques des capacités de traitement et de manipulation des unités phonologiques.

Même si plusieurs travaux soutiennent l'hypothèse d'un trouble des représentations phonologiques dans la dyslexie, certains résultats empiriques suggèrent que la dégradation des représentations phonologiques ne serait pas systématique. En effet, des études ont montré que les dyslexiques présentaient un effet de similarité phonologique et un effet de fréquence phonotactique comme les sujets contrôles, ce qui est évocateur d'une préservation des représentations phonologiques et du codage phonologique (Demont et Botzung, 2003 ; Nithart et al., 2009).

Dans une revue de littérature, Ramus et Szenkovits (2008) se sont intéressés aux différentes études qui ont évalué les représentations phonologiques des personnes dyslexiques, en utilisant des tâches impliquant un minimum de capacités métacognitives ou de MT. Ils ont observé que les représentations phonologiques des dyslexiques pouvaient être préservées. Selon ces auteurs, les difficultés phonologiques des personnes dyslexiques correspondraient donc davantage à un trouble d'accès aux représentations phonologiques. Les résultats de Ramus et al. (2013) relevés chez des enfants présentant un TDL, une dyslexie développementale, ou une association de ces deux troubles corroborent cette hypothèse. Dans cette étude, seulement un tiers des enfants avec une dyslexie développementale isolée présentait un trouble au niveau des représentations phonologiques dans des tâches de perception catégorielle et de répétition simple de non-mots.

Boets et al. (2013) ont cherché à préciser la nature des troubles phonologiques dans la dyslexie grâce à l'imagerie cérébrale. Durant la réalisation des épreuves phonologiques, l'activation du cortex auditif primaire impliqués dans le stockage des informations phonologiques ne différait pas chez les personnes dyslexiques, en comparaison au groupe contrôle. Cependant, une dysconnectivité entre les régions temporo-pariétales et les régions corticales frontales a été observée dans le groupe avec dyslexie. Pour les auteurs, ces données corroborent l'hypothèse d'une préservation des représentations phonologiques dans la



dyslexie, qui peuvent être toutefois difficilement accessibles en raison de la dysconnectivité évoquée précédemment.

### **3.4. Le déficit dans les tâches de conscience phonologique et de MT : une interprétation univoque ?**

Sur le plan clinique, l'implication de différentes capacités cognitives dans les épreuves de conscience phonologique et de MT verbale renvoie à plusieurs interprétations possibles des difficultés des dyslexiques dans ces différentes tâches.

D'une part, la composante mnésique des tâches de conscience phonologique permet difficilement aux cliniciens de conclure sur l'origine des difficultés dans ce type d'épreuve. En effet, il est possible que les déficits des personnes dyslexiques dans les tâches de conscience phonologique soient en lien avec un trouble d'accès aux représentations phonologiques. Toutefois, comme les dyslexiques peuvent aussi présenter un trouble de MT, il est difficile d'exclure que les difficultés observées dans les tâches de conscience phonologique s'expliquent par la composante mnésique des épreuves utilisées.

D'autres part, plusieurs facteurs semblent intervenir dans les tâches de MT verbale. En effet, des déficits de MT verbale peuvent être observés pour différentes raisons telles que des difficultés à activer et à maintenir l'identité des informations à mémoriser (MT de l'item), des difficultés à encoder et à maintenir les aspects sériels (MT de l'ordre sériel), ou des difficultés de contrôle attentionnel (Majerus et al., 2015). De plus, certaines données suggèrent que les déficits de MT phonologique ne sont pas systématiquement la conséquence d'un trouble d'accès aux représentations phonologique. Il a ainsi été observé que des déficits de MT phonologiques pouvaient être observés chez des enfants dyslexiques sans être associés à un trouble de la conscience phonologique (Mundy & Hannant, 2020).

En résumé, bien qu'il soit possible d'observer un trouble des représentations phonologiques chez certaines personnes dyslexiques, plusieurs études suggèrent que le trouble phonologique dans la dyslexie correspond davantage à un déficit d'accès aux représentations phonologiques. Ce déficit serait observé plus particulièrement lorsqu'il est nécessaire de s'appuyer sur d'autres capacités cognitives pour mobiliser des représentations

phonologiques, notamment dans les tâches de conscience phonologique, de dénomination rapide et de MT verbale. Comme les tâches de métaphonologie mobilisent les capacités de MT, nous nous intéresserons dans le chapitre suivant à la manière dont ces processus fonctionnent afin de mieux comprendre leurs implications spécifiques dans l'apprentissage du langage écrit et la dyslexie.

## **Chapitre 2 : La mémoire de travail et ses déficits dans la dyslexie**

### **1. Les différents déterminants de la MT verbale**

Avant d'aborder les déficits de MT chez les personnes dyslexiques, nous présentons les différents déterminants impliqués dans le fonctionnement de la MT verbale.

#### **1.1. La boucle phonologique du modèle de Baddeley**

Dans les premiers modèles de MT, Baddeley (1986) propose une approche fractionnée de ce système. Il distingue un système de stockage temporaire comportant le calepin visuo-spatial et la boucle phonologique, d'un système de contrôle attentionnel correspondant à l'administrateur central. Il ajoutera plus tardivement à son modèle le buffer épisodique chargé du stockage temporaire d'informations multimodales et de l'intégration des informations en MLT (Baddeley, 2000).

La boucle phonologique est sous-tendue par le stock phonologique et le mécanisme de récapitulation articulatoire. Dans le stock phonologique, l'information verbale est codée sous forme phonologique et est maintenue pendant une courte durée (d'une seconde et demie à deux secondes) car les représentations phonologiques se dégradent avec le temps si elles ne sont pas répétées/réactivées. Le processus de récapitulation articulatoire permettrait cependant de réactiver et de maintenir l'information verbale dans le stock phonologique. La récapitulation articulatoire permettrait aussi de transformer du matériel verbal présenté visuellement en code phonologique afin de l'introduire dans le stock phonologique. Le modèle de Baddeley permet d'expliquer quatre effets observés dans les tâches qui mesurent la boucle phonologique : les effets de similarités phonologique, d'écoute inattentive, de suppression articulatoire et de longueur.

Les effets de similarité phonologique s'observent lorsque les individus présentent de meilleures performances pour rappeler des listes de mots/non-mots phonologiquement dissimilaires en comparaison à des listes d'items phonologiquement similaires (Coltheart, 1993; Macnamara, Moore, & Conway, 2011; Nimmo & Roodenrys, 2004). Pour Baddeley (1986), cet effet résulte de la rétention des informations verbales dans le stock phonologique

qui repose sur un codage phonologique, rendant ainsi les codes des items phonologiquement proches plus difficiles à distinguer. Par conséquent, cela favorise des confusions et entraîne un moins bon rappel des items phonologiquement similaires par rapport à des mots/non-mots phonologiquement dissimilaires.

L'effet d'écoute inattentive est caractérisé par de meilleures performances dans les tâches de MT verbale lorsque les items à mémoriser sont présentés seuls que lorsque des distracteurs sont présents sous forme de phonèmes non pertinents. (Buchner & Erdfelder, 2005; Hadlington et al., 2004; Salamé & Baddeley, 1987). Pour Baddeley, cet effet d'écoute inattentive serait consécutif à l'interférence entre les stimuli distracteurs et les items à mémoriser dans le stock phonologique.

L'effet de suppression articulatoire correspond à un fléchissement des performances dans les tâches de MT verbale lorsqu'il est demandé aux individus d'articuler d'autres items verbaux durant la présentation des items à mémoriser (Toppino & Pisegna, 2005). Pour Baddeley, cet effet serait en lien avec le mécanisme de récapitulation articulatoire qui n'est plus disponible pendant l'articulation pour réactiver les traces mnésiques dans le stock phonologique.

Les effets de longueur correspondent au fait que les individus ont de meilleures performances pour rappeler des listes mots courts que des listes de mots longs (Baddeley et al., 1975). D'après Baddeley, les mots longs seraient plus sensibles à la dégradation des traces mnésiques dans le stock phonologique puisque le processus de récapitulation articulatoire aurait besoin de plus de temps pour réactiver ces items par rapport à des mots courts. Si le modèle de Baddeley présente l'intérêt de proposer une approche modulaire de la MT, il ne permet pas d'identifier l'ensemble des processus cognitifs susceptibles d'être perturbés lors d'une atteinte de ce système ni d'expliquer l'influence des connaissances stockées en MLT sur la MT.

## **1.2. L'influence des représentations sémantiques et phonologiques en MLT**

De nombreuses études montrent que les connaissances langagières sont un facteur déterminant de la MT verbale (Majerus, 2010). Autrement dit, la quantité de mots rappelés dans les épreuves de MT verbale telles que les tâches d'empans, appelées également tâche

de rappel sériel immédiat (RSI), dépend des connaissances langagières phonologiques et lexico-sémantiques. Concernant les aspects lexico-sémantiques, il a été mis en évidence des effets de lexicalité avec de meilleures performances pour le rappel de listes de mots par rapport à des listes de non-mots (Hulme et al., 1991 ; Poirier et Saint-Aubin, 1996). Il existe également des effets de fréquence lexicale avec un meilleur rappel de liste de mots fréquents en comparaison à des listes de mots moins fréquents (Roodenrys et al., 1994 ; Roodenrys et Quinlan, 2000 ; Watkins et Watkins, 1977). Le meilleur rappel de mots à faible degré d'imagerie par rapport à des mots à degré d'imagerie élevé illustre également l'intrication des connaissances stockées en MLT avec les capacités de MT (Romani et al., 2008; Walker & Hulme, 1999). En ce qui concerne l'influence des connaissances phonologiques, des effets de fréquence phonotactique sont observés lorsque des non-mots composés de phonèmes fréquemment associés dans la structure phonologique d'une langue sont mieux rappelés que des non-mots contenant des phonèmes plus rarement associés entre eux (Gathercole et al., 1999 ; Thorn et Frankish, 2005). Il a également été démontré que l'apprentissage de nouvelles règles combinatoires de phonèmes fournissait aux participants de nouvelles connaissances phonotactiques permettant d'améliorer leurs performances en rappel de listes de non-mots (Majerus, Martinez Perez, & Oberauer, 2012).

Plusieurs études de neuroimagerie soutiennent les interactions entre la MT verbale et les représentations langagières stockées en MLT. En effet, des chercheurs ont observé que les régions temporales inférieures, moyennes et supérieures, correspondant aux aires associées au traitement du langage étaient impliquées dans les tâches de MT verbale et restaient activées lors du maintien en MT des informations en l'absence de stimuli verbaux (Fiebach et al., 2007; Majerus et al., 2010; Martin et al., 2003).

Certaines données suggèrent par ailleurs que les déficits de maintien en MT des informations phonologiques et sémantiques sont sous-tendus par des mécanismes distincts. Il a ainsi été observé que des patients présentant une atteinte progressive des représentations sémantiques en raison d'une démence sémantique montraient un déficit sévère dans les tâches de MT impliquant des mots avec une réduction des effets de lexicalité, tandis que leurs capacités étaient préservées pour les tâches de MT comportant des non-mots (Patterson et al., 1994 ; Knott et al., 1997 ; Majerus et al., 2007). Ces patients présentaient donc un déficit spécifique de MT verbale pour les informations lexico-sémantiques. Comme la démence

sémantique est caractérisée par une perte de matière grise au niveau de la voie ventrale du langage (Desgranges et al., 2007), ces résultats suggèrent que cette voie ventrale est impliquée dans le maintien de l'information sémantique en MT (Majerus, 2013a). Cette voie ventrale serait surtout impliquée dans l'accès au sens (Hickok & Poeppel, 2007). D'autres études ont observé des profils de patients avec des lésions au niveau de la voie dorsale du langage qui présentaient un déficit de MT verbale spécifiquement pour les informations phonologiques (Vallar et al., 1990 ; Majerus et al., 2004 ; Takayama et al., 2004). Cette voie serait associée au traitement sublexical de l'information linguistique, permettant une segmentation de l'information en unités phonologiques conduisant à un traitement en MT phonologique (Hickok & Poeppel, 2007).

### **1.3. Les aspects sériels de la MT**

Plusieurs modèles de la MT verbale prennent en compte les mécanismes permettant le maintien temporaire et le rappel de l'ordre sériel des informations, correspondant à la capacité à rappeler des éléments verbaux ou des phonèmes en fonction de leur position sérielle lors de la présentation d'une liste ou d'un stimulus (Brown et al., 2000; Burgess & Hitch, 2006; Gupta, 2006; Henson, 1998). Ces mécanismes de maintien de l'ordre sériel en MT ne seraient pas limités aux informations verbales mais concerneraient également les informations visuo-spatiales et auditives (Gorin et al., 2016; Hurlstone et al., 2014).

Plusieurs hypothèses théoriques ont été proposées concernant le codage de l'ordre sériel en MT. Henson (1998) distingue trois types de modèles théoriques : les modèles d'enchaînement, les modèles ordinaux et les modèles positionnels. Il considère que les modèles positionnels sont ceux qui permettent le mieux de comprendre les effets de primauté et de récence, mais également les différents types d'erreurs observés dans les tâches de rappel sériel immédiat. La théorie positionnelle suppose que l'ordre est stocké en MT en associant chaque élément à sa position dans la séquence. Dans son modèle « start-end », Henson propose que la position d'un élément dans une séquence soit codée par rapport au début et à la fin de cette séquence. Ces informations concernant la position seraient codées lors de chaque présentation et répétition d'un élément, créant ainsi un marqueur de position dans la MT. L'ordre des éléments stocké en MT serait ainsi récupéré en utilisant les marqueurs

de position pour chaque position lors du rappel. En outre, il a été proposé que le codage de l'ordre sériel repose sur des codes spatiaux, temporels ou d'autres codes contextuels (Abrahamse et al., 2014). Dans cette perspective, les marqueurs de position permettant un codage de l'ordre sériel en MT correspondraient à des coordonnées dans un système interne spatialement défini. De plus, l'attention spatiale serait impliquée dans la représentation de l'ordre sériel dans la MT. L'attention spatiale est définie comme l'attention portée à la localisation spatiale d'un élément (Vecera & Rizzo, 2003). La récupération de l'ordre sériel des informations en MT reflèterait donc en partie la capacité de sélection de l'attention spatiale. Par conséquent, lorsque notre système cognitif serait confronté à des séquences d'éléments verbaux à maintenir en MT, il générerait un modèle spatial interne et les éléments encodés auraient une valeur spatiale en étant liées à cette structure afin de maintenir l'ordre sériel. Sur le plan empirique, Van Dijck et al. (2013) ont montré que la vitesse de détection de points à gauche et à droite dans une tâche d'attention spatiale était modulée par la récupération d'éléments verbaux (chiffres) organisés de manière sériel dans la MT. En effet, plus la position récupérée en MT au cours de la tâche de détection de points était tardive, plus la réponse de détection de points était rapide pour les points du côté droit par rapport à ceux du côté gauche. La récupération d'un élément en MT entraînait donc des déplacements de l'attention en fonction de la position de l'élément récupéré en MT. Ces résultats ont été répliqués avec des stimuli verbaux différents tels que des lettres (Van Dijck et al., 2014). De Belder et al., (2015) ont, par ailleurs, montré que la récupération d'une séquence verbale en MT pouvait être facilitée ou entravée par des repères spatiaux. Ainsi, les premiers éléments d'une séquence verbale en MT étaient récupérés plus rapidement après avoir été perçus du côté gauche de l'espace, tandis que les derniers éléments étaient récupérés plus rapidement après avoir été perçus du côté droit de l'espace. D'autres études suggèrent que l'ordre sériel en MT verbale est codé le long de l'axe horizontal, les éléments initiaux étant associés à la gauche et les derniers éléments à la droite (Guida et al., 2016; Van Dijck & Fias, 2011). L'effet *SPoARC* (*Spatial-Positional Association of Response Codes*) correspond au fait que les sujets sont plus rapides pour donner des réponses de la main gauche avec des nombres à mémoriser présentés dans les premières positions de la phase de présentation, tandis que leurs réponses de la main droite sont plus rapides avec les nombres à mémoriser présentés dans les dernières positions (Guida & Campitelli, 2019). En utilisant des enregistrements électroencéphalographiques continus, Rasoulzadeh et al. (2021) ont montré que la

récupération d'items verbaux stockés de manière sérielle en MT impliquait des mécanismes d'attention spatiale et génèrait des potentiels évoqués liés à l'attention qui étaient similaires à ceux généralement observés en réponse à des indices spatiaux dans l'espace externe et dans la MT visuo-spatiale.

#### **1.4. Le contrôle attentionnel en MT**

Nous avons mentionné précédemment que l'attention spatiale pouvait être impliquée dans le MT de l'ordre sériel. Toutefois, la plupart des théories de la MT considèrent que l'attention est une composante essentielle de la MT même pour des tâches de MT simples telles que les tâches d'empan de mots ou d'empan de chiffres au-delà de la MT de l'ordre sériel. Par exemple, le modèle des processus emboîtés de la MT (Cowan, 1999) considère que la MT résulte de la partie de la MLT qui est activée et maintenue dans le focus attentionnel qui correspond à l'attention. Les informations activées dans le focus attentionnel seraient ainsi préservées du déclin temporel et/ou des interférences entraînant l'oubli. Le focus d'attentionnel définirait ainsi notre champ d'attention et est considéré comme étant limité à 4 unités (Cowan, 2000 ; Oberauer, 2008). Par ailleurs, Engle et Kane (2003) ont proposé une revue de littérature en considérant que le contrôle attentionnel était nécessaire pour protéger la MT des stimuli interférents et pour maintenir l'objectif de la tâche en cours. Camos & Barrouillet, (2014a) proposent de distinguer deux mécanismes qui assurent le maintien de l'information en MT et qui permettent limiter les phénomènes d'oubli liés à l'interférence et à la dégradation temporelle de la trace mnésique. Le premier renvoie à un mécanisme non-attentionnel correspondant au processus de répétition subvocale similaire à celui décrit en lien avec la boucle phonologique du modèle de Baddeley. Ce mécanisme de maintien en MT utiliserait les processus langagiers pour réactiver les traces de la mémoire phonologique. Le second mécanisme correspond à un processus de « rafraîchissement attentionnel », initié par une focalisation attentionnelle portée de manière séquentielle sur chaque trace mnésique à réactiver. Sur le plan empirique, plusieurs études menées chez des enfants ont montré que l'attention sélective pouvait expliquer jusqu'à 30% de la variance dans une tâches de MT impliquant le maintien de l'ordre sériel et d'informations lexico-sémantiques (Cowan al., 2005 ; Majerus et al., 2009).



D'autres théories considèrent que le contrôle attentionnel intervient plus directement dans les tâches d'empans complexes, lorsque les informations à mémoriser doivent être traitées et/ou manipulées (Baddeley, 1986 ; Baddeley et al., 2021). Le modèle de Baddeley (1986) considère que l'administrateur central est spécifiquement impliqué dans la manipulation, la coordination et la transformation d'informations stockées en MT. Baddeley distingue ainsi trois fonctions exécutives au sein de l'administrateur central telles que l'attention focalisée, l'attention divisée et la capacité à alterner entre différentes tâches ou stratégie (flexibilité). Pour Barrouillet et al. (2009) le traitement et le maintien de l'information en MT dans des tâches d'empans complexes reposent sur une même ressource limitée correspondant à l'attention. Ainsi, lorsque l'attention est mobilisée pour le traitement d'une tâche secondaire, elle n'est plus disponible pour le rafraichissement des informations. Par conséquent, lorsque l'attention est détournée des processus de réactivation des informations en MT, les traces mnésiques se dégradent dans le temps. Le traitement et le maintien de l'information en MT se dérouleraient donc de manière séquentielle, avec un partage de l'attention qui s'effectuerait par un processus rapide et continue d'alternance entre le traitement et le maintien de l'information MT. Pour Camos & Barrouillet (2014) les capacités de MT dans les tâches d'empan complexe dépendent de trois facteurs principaux. Le premier facteur correspond à la vitesse de dégradation des informations stockées en MT (déclin mémoriel). Le second facteur concerne l'effet de la charge cognitive lorsqu'une tâche secondaire doit être effectuée durant le maintien d'une information en MT. Le troisième facteur renvoie à l'efficacité du mécanisme d'alternance attentionnel entre la tâche de traitement et la réactivation des informations stockées en MT. Il a été proposé que la charge cognitive d'une tâche d'empan complexe soit déterminée par le ratio du temps requis par une tâche mobilisant l'attention, par rapport au temps disponible pour le traitement des informations mémorisées (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004). Dans le paradigme développé par Barrouillet et ses collaborateurs, le temps disponible pour effectuer une tâche secondaire (par exemple, le jugement de la parité des nombres) est manipulé pendant que les participants doivent encoder et maintenir en mémoire une liste d'items verbaux (par exemple, des chiffres). La diminution de la performance pour le rappel d'items verbaux sur des tâches secondaires très exigeantes sur le plan attentionnel par rapport à d'autres moins exigeantes (c'est-à-dire avec une pression temporelle élevée ou faible), permet d'estimer la sensibilité à la charge cognitive reflétant les capacités de contrôle attentionnel en MT. En utilisant le même

paradigme, Vergauwe et al. (2014) ont étudié, plus en détail, l'interaction entre la charge de MT et le contrôle attentionnel en faisant varier le nombre d'éléments à maintenir en mémoire. Ils ont observé que le traitement des tâches secondaires commençait à être perturbé pour une charge de MT de trois items ou plus, suggérant qu'une charge de MT verbale plus élevée représentait également des demandes de contrôle attentionnel plus élevées. Ces résultats suggèrent, par ailleurs, que dans les tâches d'empans et de rappel sériel immédiat plus le nombre de stimuli à maintenir est élevé, plus la charge de MT peut être considérée comme étant élevée puisque que les processus de maintien sont davantage sollicités.

La gestion de la charge de MT peut donc être considérée comme une caractéristique essentielle des processus de maintien en MT (Ravizza et al. 2004; Todd and Marois 2004). De plus, certaines études ont montré que ces effets de charge de MT sollicitaient des réseaux neuronaux différents de ceux mobilisés spécifiquement pour la rétention d'informations phonologiques ou lexico-sémantiques. En effet, le réseau dorsal de l'attention impliquant les régions pariétales postérieures et frontales supérieures s'est révélé sensible aux variations de la charge de MT (Todd et Marois 2004 ; Todd et al. 2005 ; Majerus et al. 2012). Plusieurs travaux ont également montré que les réseaux frontopariétaux centrés autour du sillon intrapariétal étaient activés dans différentes modalités de tâches de MT avec une sensibilité à la charge de MT dans des conditions verbales, visuelles et auditives (Brahmbhatt et al. 2008 ; Majerus et al. 2010 ; Chein et al. 2011 ; Cowan et al. 2011). Cette sensibilité du réseau dorsal de l'attention à la charge de MT a été observée pendant les phases d'encodage et de récupération, mais également durant la phase de maintien lorsque les stimuli à mémoriser ne sont plus présents dans l'environnement (Majerus, Cowan, et al., 2016). Une autre étude a par ailleurs montré que l'activation des régions de la voie dorsale du langage n'était pas dépendante de l'augmentation de la charge de MT dans une tâche de jugement de rime (Martin et al., 2003).

Les aspects attentionnels sont donc considérés comme étant associés aux capacités de MT, avec une distinction entre deux types de mécanismes attentionnels. Un premier type correspond au contrôle attentionnel, impliqué plus spécifiquement dans le contrôle de l'exécution de la tâche en fonction de ses exigences, avec la mise en œuvre de stratégies pour sélectionner, encoder et maintenir les stimuli, ainsi que pour procéder au rafraîchissement attentionnel des informations mémorisées (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Engle,

Kane, & Tuholski, 1999 ; Cowan, 1995). Ce contrôle attentionnel peut également être associé à certains aspects de l'administrateur central du modèle de Baddeley (1986). Un second type de mécanisme attentionnel reflète par ailleurs un aspect moins stratégique de l'attention car il concerne davantage la focalisation sur le stimulus, correspondant ainsi au focus attentionnel décrit par Cowan (1995, 2001) et renvoyant à la quantité limitée de stimuli dont un individu peut être conscient à un moment donné. Les performances dans les tâches d'empan et la sensibilité à l'augmentation de la charge de MT en lien avec l'augmentation du nombre de stimuli à maintenir en MT pourraient ainsi refléter les capacités de ce focus attentionnel. Certaines données suggèrent par ailleurs que le contrôle attentionnel et le focus attentionnel sont deux fonctions distinctes mais pas totalement indépendantes (Cowan et al., 2006).

Gray et al. (2017) ont testé l'adéquation de trois modèles de MT, en utilisant une batterie d'évaluation de la MT auprès de 168 enfants au développement typique âgés de 7 à 9 ans. Leurs analyses factorielles confirmatoires ont montré qu'un modèle hybride à trois composantes de la MT incluant l'administrateur central et la boucle phonologique du modèle de Baddeley (1986) ainsi que le focus de l'attention du modèle de Cowan (2005) correspondait le mieux aux données. L'administrateur central comprenait deux tâches de n-back et une tâche de mise à jour. Le focus de l'attention était composé de tâches d'empan visuel et d'empan visuo-spatiaux, mais également d'épreuves d'empan visuospatiaux et verbaux dont la longueur des listes était imprévisible ne permettant pas aux enfants de répéter les informations (Cabbage et al., 2017). Le fait que les tâches d'empan visuospatiaux et verbaux de longueur imprévisibles soit associées au même facteur de focus attentionnel suggère que ce focus attentionnel intervient en MT à travers différentes modalités sensorielles.

Des données en neuroimagerie suggèrent également une possible distinction entre le contrôle attentionnel et le focus de l'attention. Majerus et al. (2018) ont étudié le rôle du réseau dorsal de l'attention dans la gestion de la charge de MT et concernant le contrôle attentionnel. Ils ont observé que pour la tâche de MT verbale, les régions fronto-temporales étaient associées au contrôle attentionnel tandis que les régions temporales supérieures étaient associées à la gestion de la charge de MT.

## **2. La distinction entre MT de l'item et MT de l'ordre sériel dans la dyslexie**

Les capacités de MT sont donc fortement déterminées par les représentations langagières stockées en MLT, les aspects sériels et les capacités attentionnelles. Dans ce contexte, afin de mieux comprendre la nature des déficits de MT dans la dyslexie, il peut être utile de faire une distinction entre des difficultés de maintien d'éléments verbaux (MT de l'item) et des difficultés de maintien de l'ordre sériel (MT de l'ordre sériel). Les données comportementales, neuropsychologiques et de neuroimagerie, qui soutiennent une distinction entre la MT de l'item et de l'ordre sériel seront d'abord présentées avant d'aborder plus spécifiquement les déficits observés dans la dyslexie.

### **2.1. La distinction et l'évaluation de la MT de l'item et de l'ordre sériel**

Plusieurs modèles théoriques de MT considèrent que le stockage temporaire de l'information « item » (MT de l'item) et le stockage de l'information « ordre sériel » (MT de l'ordre sériel) sont soutenus par des mécanismes distincts (Attout et al., 2018 ; Burgess & Hitch, 1999; Burgess & Hitch, 2006). La MT de l'item implique le stockage des éléments verbaux ainsi que de leurs caractéristiques phonologiques (forme du mot) et lexico-sémantiques (sens du mot) qui permettent par exemple de distinguer un mot d'un autre (Nairne & Kelley, 2004). Ces éléments verbaux concernent les mots et les non-mots, mais impliquent également les unités sublexicales qui les composent telles que les syllabes et les phonèmes. La MT de l'item est ainsi considérée comme interagissant fortement avec la base de connaissances linguistiques car elle renvoie à l'activation des bases de connaissances stockées en MLT (Majerus, 2009 ; Saint-Aubin & Poirier, 1999). Concernant la MT de l'ordre sériel, elle permet de stocker l'ordre sériel dans lequel les différents éléments ont été présentés et serait sous-tendue par des codes spatiaux, temporels ou d'autres codes contextuels (van Dijck et al., 2013 ; Abrahamse et al., 2014).

La distinction entre la MT de l'ordre sériel et la MT de l'item est soutenue par des études comportementales et neuropsychologiques. Il a été montré qu'une tâche concurrente de reproduction de rythme impactait négativement les performances sur une tâche de MT de l'ordre sériel mais pas sur une tâche de MT de l'item (Gorin et al., 2016). Sur le plan

neuropsychologique, des dissociations entre les déficits de MT de l'ordre sériel et de MT de l'item ont également été observées chez des enfants et des adultes atteints de différents troubles neurodéveloppementaux et neurologiques (Majerus et al., 2007; Majerus, Attout, Artielle, & Van Der Kaa, 2015; Schraeyen, Van Der Elst, et al., 2019). La distinction entre la MT de l'ordre sériel et la MT de l'item est également soutenue par des données en neuroimagerie. Plusieurs chercheurs ont observé que les régions fronto-temporal étaient associées à la MT de l'item tandis que les réseaux fronto-pariétaux étaient impliqués dans la MT de l'ordre sériel (Attout et al., 2019 ; Kalm & Norris, 2014 ; Majerus et al., 2010 ; Marshuetz et al., 2000 ; Papagno et al., 2017).

Une partie de l'ensemble de ces résultats a été obtenue en analysant les performances des participants en fonction du type de rappel (item vs. ordre sériel) dans des tâches de RSI ou en utilisant des épreuves spécifiques qui permettent de distinguer les capacités de MT de l'item et de l'ordre sériel. Concernant l'analyse du type de rappel dans les tâches de RSI, il s'agit de calculer un score de rappel « item » en fonction la proportion d'items correctement rappelés indépendamment de leur position sérielle et un score « ordre sériel » en fonction de la proportion d'items rappelés dans la bonne position sérielle.

D'autres données empiriques sont issues d'une autre approche qui consiste à utiliser des tâches qui maximisent soit le stockage de l'identité des informations à mémoriser (MT de l'item) soit le stockage de l'ordre sériel des informations à mémoriser (MT de l'ordre sériel). Afin d'évaluer la MT de l'item en la différenciant de la MT de l'ordre sériel une tâche de répétition différée de pseudo-mots a été développée et validée (Leclercq & Majerus, 2010; Majerus, Poncelet, Greffe, et al., 2006; Majerus, Van der Linden, et al., 2007). Dans cette tâche, les participants doivent répéter des pseudo-mots unisyllabiques de structure consonne-voyelle-consonne après un bref délai comportant une tâche interférente verbale. Cette tâche de répétition de pseudo-mots permet de minimiser les mécanismes d'encodage et de maintien de l'ordre sériel en MT pour plusieurs raisons. Premièrement, tous les items disposent de la même structure courte unisyllabique CVC ce qui limitent le traitement sériel des pseudo-mots contrairement à d'autres tâches qui utilisent des items multi-syllabiques. Deuxièmement, un seul pseudo-mot doit être mémorisé pour chaque essai. Troisièmement, la tâche interférente verbale empêche la récapitulation articulatoire qui peut être associé au stockage de l'ordre sériel.

Pour évaluer la MT de l'ordre sériel en la distinguant de la MT de l'item, des tâches de reconstruction de l'ordre sériel ont été développées (Leclercq & Majerus, 2010; Majerus et al., 2006, Martinez Perez et al., 2012). Ces tâches consistent en la présentation auditive de listes croissantes d'items familiers. Des cartes représentant les différents items énoncés sont ensuite fournies au participant qui doit reconstruire l'ordre de présentation des items cibles. Ces tâches de reconstruction d'ordre sériel permettent de minimiser le stockage sous-tendu par la MT de l'item car il s'agit d'item très familiers (des noms d'animaux ou des chiffres) que le participant connaît à l'avance et qui restent les mêmes tout au long de l'épreuve. De plus, l'ordre sériel dans lequel sont présentés les items est le seul élément qui varie dans les différentes séquences présentées et les items sont toujours disponibles pour le participant sur les cartes durant le rappel impliquant uniquement la reconstruction de l'ordre sériel. Une épreuve de reconstruction d'ordre sériel a également été développée en modalité non verbale avec des symboles non verbalisables (Hachmann et al., 2014).

## **2.2. MT de l'item et de l'ordre sériel dans l'apprentissage du langage écrit**

Plusieurs études longitudinales ont cherché à préciser l'implication de la MT dans l'acquisition de la lecture, en distinguant la rétention de l'item et la rétention de l'ordre sériel. Demont et al. (2010) ont exploré le rôle de la MT de l'ordre sériel et de la conscience phonologique dans l'apprentissage de la lecture. Il s'agissait d'une étude longitudinale menée auprès d'un groupe d'enfants sans retard scolaire de la grande section de maternelle jusqu'à la fin du cours préparatoire. Leurs résultats ont suggéré une contribution précoce de la conscience phonologique lors de l'acquisition du principe de correspondance grapho-phonémique. Le rôle de la conscience phonologique serait ensuite réduit en raison d'une contribution plus tardive de la MT de l'ordre sériel, afin d'automatiser les règles de correspondance grapho-phonémique. Martinez Perez et al. (2012) ont mené une étude longitudinale auprès d'enfants et ont observé que la capacité de MT de l'ordre sériel, prédisait de manière indépendante les performances de décodage de la lecture mesurées un an plus tard, et non la capacité de MT de l'item. Hachmann et al. (2020) ont fourni d'autres données montrant que la MT de l'ordre sériel était un facteur important dans le développement précoce des capacités de lecture, en particulier lors du décodage et de la conversion

graphème-phonème. Binamé et Poncelet (2016) ont observé en première et deuxième année que la capacité MT d'ordre sériel était un prédicteur indépendant solide de la performance en lecture de non-mots et en orthographe, mais n'était pas liée aux capacités de lecture et d'orthographe de mots fréquents et irréguliers. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle la MT de l'ordre sériel ne contribue pas directement à la lecture et à l'orthographe lorsque les représentations orthographiques dans la MLT peuvent être utilisées pour la lecture ou l'orthographe des mots. Ordonez Magro et al. (2020, 2021) ont montré que les capacités de MT de l'ordre sériel restaient cependant prédictives des capacités de lecture et d'orthographe des mots réguliers et irréguliers pour les enfants de la deuxième année de l'école élémentaire, probablement parce que la procédure de lecture non lexicale est toujours utilisée, car les représentations orthographiques ne sont pas encore entièrement représentées dans la MLT. Il est donc probable que l'implication de la MT de l'ordre sériel dans les performances de lecture soit modulée par la qualité et la quantité des représentations orthographiques stockées dans la MLT. Ainsi la MT de l'item pourrait être surtout impliquée dans le codage phonologique, défini par Leinenger (2014) comme le recodage de l'information écrite et orthographique en un code basé sur le son. En revanche, la MT de l'ordre sériel pourrait être surtout impliquée dans le décodage séquentiel en lecture, lorsque les produits successifs des processus de conversion lettre-son doivent être stockés de manière séquentielle avant la prononciation des mots écrits (Martinez Perez, Majerus, & Poncelet, 2012).

### **2.3. MT de l'item et de l'ordre sériel dans la dyslexie**

Plusieurs interprétations ont été envisagées concernant les mécanismes impliqués dans le déficit de MT verbale chez les personnes dyslexiques. Kibby (2009) a observé dans des tâches de RSI que des enfants dyslexiques obtenaient des résultats comparables à ceux du groupe contrôle pour les mots fréquents, mais présentaient un déficit pour les mots peu fréquents et les non-mots. De plus, le déficit de MT pour les mots peu fréquents persistait lorsque les habiletés de conscience phonologique (tâche de suppression de phonème) et le QI verbal des participants étaient contrôlées, suggérant ainsi que ce déficit n'était pas dû à une mauvaise conscience phonologique ou à un manque de vocabulaire. Les enfants dyslexiques montraient par ailleurs des effets de longueur mais ne montraient pas d'effet de similarité

phonologique quelle que soit la nature ou la fréquence des stimuli, suggérant ainsi une atteinte spécifique du stock phonologique et une préservation du processus de récapitulation articulatoire. D'autres recherches ont cependant suggéré que les enfants dyslexiques présentaient un déficit de MT verbale en raison d'un ralentissement de la vitesse d'articulation lorsqu'il leur était demandé de répéter des mots à voix haute le plus rapidement possible (McDougall et al., 1994, 2002 ; Roodenrys & Stokes, 2001). Pour Kibby (2009), plusieurs facteurs peuvent expliquer le déficit de MT verbale des enfants dyslexiques lorsqu'ils doivent stocker en MT des stimuli verbaux peu fréquents : des représentations en MLT moins nombreuses ou de moins bonne qualité, un traitement, un codage et/ou un stockage phonologique perturbé et un ralentissement de la vitesse d'articulation lorsqu'elle est utilisée. Concernant représentations stockées en MLT, les connaissances linguistiques sont affaiblies sur les aspects phonologiques alors que les représentations lexico-sémantiques sont préservées (Ramus et Ahissar, 2012). Martinez Perez et al. (2013) ont également fourni des données en faveur d'un déficit de MT de l'item consécutif à un manque de précision des représentations phonologiques stockées en MLT chez les personnes avec une dyslexie. Leur étude a montré que des adultes dyslexiques présentaient des difficultés de MT de l'item dans une tâche répétition différée de non-mots tandis que leurs capacités étaient préservées dans une épreuve de reconnaissance. Pour les auteurs, les représentations phonologiques des dyslexiques étaient suffisantes pour la reconnaissance de non-mots mais pas pour leur répétition. Une étude explorant les corrélats neuronaux des capacités de MT a montré que des adultes dyslexiques avaient tendance à montrer une activation plus importante des zones associées aux processus de contrôle exécutif et attentionnel dans une tâche de MT verbale de l'item (Martinez Perez et al., 2015). Les auteurs de cette étude ont suggéré que les personnes avec une dyslexie avaient besoin de davantage de ressources exécutives et attentionnelles pour traiter des mots en situation de MT par rapport aux individus sans dyslexie.

La plupart des études qui ont montré un déficit de MT verbale chez des enfants et des adultes dyslexiques ont utilisé soit des tâches d'empan de chiffres endroits, soit des épreuves de rappel sériel immédiat de mots et de non-mots (Jeffries & Everatt, 2004a; Menghini et al., 2011; Sela et al., 2012a; Szenkovits & Ramus, 2005; Tiffin-Richards et al., 2008b; Varvara et al., 2014a). Cependant, ces tâches ne permettent pas de distinguer les déficits de MT de l'item des déficits de MT de l'ordre sériel. En effet les tâches d'empan et de RSI sont multi-



déterminées puisqu'elles nécessitent à la fois le maintien de l'identité des informations (item) et celui de l'ordre sériel. Toutefois, au regard de l'implication spécifique et indépendante de la MT de l'item et de l'ordre sériel dans l'acquisition du langage écrit, il peut être utile de distinguer la MT de l'item et la MT de l'ordre sériel pour mieux comprendre la nature des déficits de MT dans la dyslexie (Majerus & Cowan, 2016).

Plusieurs études ont investigué les capacités de MT chez des enfants avec une dyslexie en distinguant la MT de l'ordre sériel et de l'item. Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al. (2012) ont administré à des enfants dyslexiques une tâche de répétition différée de non-mot pour évaluer la MT de l'item phonologique et une tâche de reconstruction de l'ordre sériel pour évaluer la MT de l'ordre sériel. Les résultats ont montré des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel, mais ces déficits semblaient indépendants. Les enfants dyslexiques présentaient un déficit de MT de l'ordre sériel par rapport aux groupes contrôle appariés à l'âge chronologique et à l'âge de lecture, tandis que le déficit MT de l'item n'était observé que par rapport au groupe contrôle apparié en âge chronologique. Staels et Van den Broeck (2014) ont également observé des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel chez des enfants dyslexiques. Cependant, ils n'ont pas trouvé de résultats en faveur de l'indépendance des deux types de déficits de MT en utilisant des analyses différentes. Une étude plus récente a de nouveau montré des déficits spécifiques de la MT de l'ordre sériel dans la dyslexie, et ce pour les tâches de MT de l'ordre sériel verbal et non verbal, alors que la MT de l'item verbal était préservée (Hachmann et al., 2020).

Des études distinguant les composantes de MT de l'ordre sériel et de l'item ont également été menées chez des adultes avec une dyslexie. Martinez Perez et al. (2013) ont montré chez des adultes dyslexiques que les déficits de MT de l'ordre sériel étaient indépendants des déficits de MT de l'item dans le domaine verbal. En revanche, une étude a suggéré que les déficits de MT de l'ordre sériel et de l'item n'étaient pas constants chez les étudiants universitaires avec un diagnostic de dyslexie (Wang et al., 2016). En utilisant une tâche de répétition de non-mots, Schraeyen et al. (2019) ont par ailleurs montré que la faible performance des personnes dyslexiques dans cette tâche était caractérisée par des erreurs d'ordre sériel (erreurs de migration de phonèmes) plutôt que par des erreurs d'identité de phonèmes. Des résultats similaires ont été observés par Romani et al. (2015) dans le domaine

de la MT visuelle, avec des difficultés spécifiques pour les formats de présentation séquentielle ou simultanée des items à mémoriser.

D'autres études menées auprès d'enfants et d'adultes atteints de dyslexie ont directement comparé les performances à des tâches de MT verbales et visuelles et ont mis en évidence des déficits de MT de l'ordre sériel dans les deux modalités (Cowan et al., 2017 ; Hachmann et al., 2014 ; Laasonen et al., 2012).

(Martinez Perez et al., 2015) ont étudié la MT de l'ordre sériel et la MT de l'item auprès d'adultes dyslexiques avec des techniques d'imagerie cérébrale. Les chercheurs ont investigué les réseaux neuronaux associés à la MT de l'item et à la MT de l'ordre sériel en utilisant des tâches de reconnaissance d'items verbaux, d'items visuels et d'ordre sériel. La MT de l'ordre sériel a été évaluée en modalité visuelle et en modalité verbale. Les résultats ont montré que même s'il existait des déficits à la fois de MT de l'item et de l'ordre sériel, ils étaient associés à des réseaux neuronaux différents. D'une part, durant la réalisation des tâches de MT de l'ordre sériel en modalité visuelle et verbale, les adultes dyslexiques montraient une sous-activation au niveau du sillon pariétale droit et dans les régions frontales supérieures. Pour les auteurs, ces régions peuvent être considérées comme étant associées à la MT de l'ordre sériel. D'autre part, durant les épreuves de MT de l'item, les adultes avec une dyslexie présentaient une sur-activation au niveau du sillon pariétal droit et du gyrus frontal moyen, ne correspondant pas à des régions spécifiques au langage. Ces régions cérébrales seraient néanmoins impliquées dans la manipulation des informations en MT et le contrôle attentionnel (Majerus et al., 2016).

### **3. Les déficits attentionnels dans la dyslexie**

Bien qu'il ne soit pas directement intégré dans un modèle de MT, le concept d'empan visuo-attentionnel (VA) (Bosse et al., 2007), étudié plus spécifiquement dans le contexte de la dyslexie, est une notion qui peut être comparée au concept de focus attentionnel proposé par Cowan (2005). Il a été défini comme la quantité d'éléments visuels distincts pouvant être traités simultanément dans un ensemble d'éléments, indépendamment de la nature verbale ou non verbale de ces éléments (Lobier et al., 2012). Ce concept de l'empan VA peut

également être étendu aux informations auditives (Lallier et al., 2013). Une série d'études s'est concentrée sur les tâches visuo-attentionnelles (VA). Ces études ont généralement montré une altération des performances pour ces tâches chez certains enfants et adultes dyslexiques (Bosse et al., 2007 ; Germano et al., 2014 ; Lobier et al., 2012 ; Saksida et al., 2016 ; Zoubrinetzky et al., 2014), soit pour les mesures de rapport global (toutes les lettres brièvement présentées doivent être rapportées), soit pour les mesures de rapport partiel (une lettre sélectionnée parmi la chaîne de lettres brièvement présentées doit être rapportée). Ces résultats pourraient suggérer des difficultés de focalisation ou de portée de la capacité d'attention dans la dyslexie, selon le cadre théorique de Cowan (1995).

Une autre ligne de recherche a étudié le contrôle attentionnel dans la MT en examinant la capacité des participants dyslexiques à maintenir et à traiter simultanément l'information dans des tâches complexes d'empan. Par exemple, un certain nombre d'études a montré un déficit dans les tâches d'empan de chiffres envers, tant chez les enfants que chez les adultes dyslexiques (Jeffries & Everatt, 2004 ; Reiter et al., 2005 ; Sela et al., 2012 ; Tiffin-Richards et al., 2008). Cependant, d'autres travaux utilisant la même tâche ou une autre tâche de stockage et de traitement de MT telle qu'une tâche d'empan de comptage complexe n'ont pas montré de performance spécifiquement altérée chez les participants atteints de dyslexie, et ce particulièrement en contrôlant les performances obtenues dans les tâches d'empan simple (Demont & Botzung, 2003 ; Kibby et al., 2004 ; Maehler & Schuchardt, 2016 ; Moura et al., 2015 ; Schuchardt et al., 2008). D'autres données ont montré une déficience plus spécifique dans les tâches de N-back (Alt et al., 2022 ; Beneventi et al., 2010 ; Sela et al., 2012), mais ce déficit pourrait provenir de difficultés à résister aux interférences proactives plutôt que de limitations des ressources attentionnelles (Bogaerts et al., 2015).

D'autres études ont examiné plus directement les capacités attentionnelles visuelles et auditives dans la dyslexie, en dehors des tâches de MT. Certains résultats ont montré un déficit de l'attention auditive soutenue chez les enfants dyslexiques, en utilisant la tâche de transmission de code du Test of Everyday Attention for Children (Manly et al., 2002) qui nécessite le suivi continu d'un flux d'informations auditives (chiffres) (Menghini et al., 2011 ; Varvara et al., 2014). Gabay et al. (2020) ont par ailleurs mis en évidence un déficit de l'attention auditive sélective chez des adultes dyslexiques lorsqu'ils devaient se concentrer sur un stimulus cible et ignorer les informations non pertinentes. En ce qui concerne l'attention

visuelle, des déficits de l'attention sélective ont à nouveau été observés chez des enfants dyslexiques (Barbosa et al., 2019 ; Lancaster et al., 2021 ; Lewandowska et al., 2014 ; Sireteanu et al., 2008) et des adultes (Jones et al., 2008) en utilisant diverses tâches de recherche visuelle et de détection de cibles. En revanche, Taran et al. (2022) ont constaté une différence non significative au niveau de l'attention visuelle sélective entre les enfants dyslexiques et les enfants au développement normal dans des tâches similaires à celles utilisées dans les études citées ci-dessus. Une méta-analyse récente a conclu que les enfants dyslexiques présentaient à la fois des taux de réussite plus faibles et des temps de réponse plus lents pour l'attention visuelle sélective dans les tâches de recherche visuelle (Hokken et al., 2022). Dans le même ordre d'idées, Perry et Long (2022) ont soutenu que l'attention visuelle était un facteur prédictif faible mais significatif de la capacité de lecture chez les personnes dyslexiques, en se concentrant sur des tâches d'empan VA, d'inhibition, de déplacement attentionnelle et de recherche visuelle.

En résumé, les déficits de MT observés dans la dyslexie ont longtemps été considérés comme résultant uniquement de leurs difficultés phonologiques. Cependant, plusieurs études ont montré que les personnes avec une dyslexie pouvaient certes présenter un déficit en MT de l'item phonologique, mais également un trouble spécifique et indépendant de la MT de l'ordre sériel. De plus, il semblerait que la MT de l'item et la MT de l'ordre sériel contribuent de manière indépendante à l'apprentissage du langage écrit. Par ailleurs, des déficits attentionnels ont fréquemment été objectivés par les différentes études menées auprès de personnes dyslexiques. Ces déficits peuvent concerner l'empan VA ainsi que l'attention soutenue et sélective en modalité visuelle et auditive. Concernant le contrôle attentionnel en MT, les résultats apparaissent contrastés, certaines études ayant montré des déficits tandis que d'autres ont observé une préservation de ces capacités.

## Chapitre 3 : La remédiation des déficits de mémoire de travail

Plusieurs formes d'intervention ont été développées pour remédier à la dyslexie. Colé & Sprenger-Charolles (2021) constatent que l'entraînement à la lecture et à la conscience phonologique montre une certaine efficacité lorsqu'ils sont proposés précocement (grande section de maternelle ou en 1<sup>ère</sup> année d'école élémentaire), mais que l'efficacité de ce type d'intervention est plus contrastée chez les enfants plus âgés. D'autres chercheurs ont développé des approches de remédiation cognitive qui visent des déficits cognitifs spécifiques pouvant être observés chez les personnes dyslexiques (Habib et al., 2016; Temple et al., 2003; Zoubrinetzky et al., 2019). La remédiation cognitive correspond à une intervention visant à réduire l'impact des déficits cognitifs dans la vie quotidienne en améliorant ou en optimisant le fonctionnement cognitif (Ben-Yishay, 2008). Bien qu'il existe différents types de remédiation de la dyslexie, ce chapitre se focalisera sur la remédiation des déficits de MT.

### 1. L'approche fonctionnelle

L'approche fonctionnelle consiste en la stimulation globale de l'ensemble de la MT sans viser spécifiquement une de ses composantes (Majerus, 2020). Cette approche fonctionnelle utilise des programmes informatisés d'entraînement de la MT comme « Cogmed » ou des outils similaires (Klingberg, et al., 2005). Il s'agit d'exercices informatisés sous forme de jeux qui stimulent la MT et dont la complexité évolue généralement en fonction des performances de l'enfant. De nombreuses études ont été menées auprès de différentes populations afin d'évaluer l'efficacité de ce type d'entraînement. Dans ce contexte, plusieurs méta-analyses ont été réalisées afin d'évaluer l'efficacité des entraînements adaptatifs et informatisés de la MT et d'étudier les variables modératrices.

Certaines méta-analyses incluaient à la fois des études menées chez des enfants et des adultes. Melby-Lervåg & Hulme (2013) ont mené une méta-analyse afin d'étudier l'efficacité de l'entraînement de la MT en sélectionnant 23 études conduites auprès de groupes d'enfants et d'adultes au développement typique ou atypique. En ce qui concerne les effets sur la MT

verbale, leurs analyses ont montré que les programmes d'entraînement produisaient des améliorations significatives des capacités de MT directement après l'intervention, avec une taille d'effet moyenne élevée. L'âge était une variable modératrice significative car les enfants plus jeunes montraient des bénéfices significativement plus importants que les enfants plus âgés. En revanche, les effets de l'entraînement n'étaient pas maintenus et devenaient non significatifs après 9 mois en moyenne avec toutefois une hétérogénéité significative entre les études. Concernant les effets sur la MT visuo-spatiale, des améliorations significatives étaient observées après les entraînements avec une taille d'effet moyenne modérée. Le type de programme était la seule variable modératrice significative avec le programme Cogmed qui démontrait des tailles d'effet plus élevées que les quatre programmes non commerciaux développés par les chercheurs pour les besoins de leurs études. Ces résultats sont cohérents puisque Cogmed est un programme qui implique beaucoup d'activités qui sollicitent la MT visuo-spatiale (Delage et al., 2020). Par ailleurs, le maintien des effets était significatif 5 mois en moyenne après l'intervention. Les auteurs se sont également intéressés au transfert des bénéfices des entraînements de MT sur d'autres habiletés cognitives et académiques. Concernant les habiletés non verbales, l'amélioration était significative avec une taille d'effet moyenne faible. Cependant, il existait une hétérogénéité entre les études concernant leur taille d'effet et le type de groupe contrôle (présence vs. absence d'entraînement alternatif) était une variable modératrice significative. Ainsi, les études avec des groupes contrôle ayant bénéficié d'un entraînement alternatif obtenaient des tailles d'effet proche de zéro tandis que les tailles d'effets des études avec des groupes contrôle sans entraînement alternatif montraient des tailles d'effets de faible à modéré. Par ailleurs, les effets des entraînements de MT sur les habiletés verbales, la lecture de mots et les compétences arithmétiques étaient non significatifs suggérant ainsi qu'il n'y avait pas de transfert et de généralisation.

Dans une autre méta-analyse, Spencer-Smith & Klingberg (2015) ont cherché à savoir si l'entraînement de la MT via Cogmed avait des effets bénéfiques, notamment sur l'inattention dans la vie quotidienne. Les auteurs ont inclus 12 études qui portaient sur des enfants, des adolescents et des adultes avec ou sans trouble neurologique. Ils ont analysé les scores des participants à l'échelle de Conners ou aux sous-échelles d'inattention des critères du Trouble du déficit d'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) du DSM IV, les résultats ont montré un effet significatif de l'entraînement via Cogmed. Des effets significatifs étaient

également observés concernant les mesures de MT verbale et visuo-spatiale. Cependant, cette méta-analyse incluait des études randomisées mais également non randomisées qui comportaient des groupes contrôle qui n'avait pas bénéficié d'entraînement alternatif. Ces éléments méthodologiques limitent la portée de ces résultats, puisque comme évoqué précédemment, la présence d'un groupe contrôle avec un entraînement alternatif ou non peut être une variable modératrice significative des tailles d'effets (Melby-Lervåg & Hulme, 2013).

Afin de prendre en compte ce biais méthodologique, Melby-Lervåg et al., (2016) ont réalisé une méta-analyse en dissociant les études qui comportait un groupe contrôle actif (avec un entraînement alternatif) des celles incluant un groupe contrôle passif (sans entraînement alternatif) pour toutes leurs analyses. Les auteurs ont également distingué 3 types de mesures correspondant à des niveaux de transfert différents des bénéfiques d'un entraînement de la MT. Les mesures de transfert proche correspondent aux tests qui sont similaires ou identiques aux tâches entraînées durant l'intervention. Les mesures de transfert intermédiaire renvoient aux épreuves qui évaluent la MT mais qui sont différentes des tâches utilisées durant l'entraînement. Les mesures de transfert distant correspondent aux tâches qui diffèrent considérablement de celles entraînées et peuvent inclure des épreuves évaluant les habiletés verbales et non verbales, le langage écrit, les compétences en mathématiques. Les résultats de cette méta-analyse ont montré des effets significatifs des entraînements de MT sur les tâches de transfert proche et de transfert intermédiaire à la fois dans les études qui comportaient un groupe contrôle passif et dans celles impliquant un groupe contrôle actif. Dans ces deux types d'étude, le maintien des effets à long terme était significatif pour les tâches de transfert intermédiaire en MT visuo-spatiale et pour épreuves de transfert proche. En revanche, le maintien des effets à long terme sur les tâches de transfert intermédiaire de MT verbale était significatif uniquement dans les études qui comportaient des groupes contrôle passifs. Concernant le transfert distant, il n'y avait pas d'effet significatif des entraînements de MT sur les tâches évaluant les habiletés verbales et la lecture de mots. De plus, les effets significatifs sur les habiletés non verbales, la compréhension en lecture et l'arithmétique étaient observés uniquement dans les études incluant un groupe contrôle passif. Par ailleurs, les évolutions sur les mesures de transfert distant (habiletés verbales et non verbales) n'étaient pas associées à l'évolution des mesures de MT. D'après cette méta-

analyse, les programmes informatisés d'entraînement de MT produisent des effets d'entraînement spécifiques à court terme qui ne se généralisent pas aux autres compétences cognitives. Les auteurs ont inclus des études qui comportaient à la fois des enfants, des adolescents et des adultes avec ou sans trouble neurologique. Comme l'âge peut être une variable modératrice des tailles d'effet en faveur des plus jeunes (Melby-Lervåg & Hulme, 2013), il est difficile de savoir si ces résultats concerne particulièrement les enfants.

D'autres méta-analyses ont étudié les effets des entraînements de MT en se focalisant plus spécifiquement sur les enfants et adolescents au développement typique. Sala & Gobet, (2017) ont étudié l'effet de l'entraînement de la MT en incluant dans leur méta-analyse les études menées auprès d'enfants âgés entre 3 et 16 ans au développement typique. Comme dans les méta-analyses impliquant une tranche d'âge plus large, des effets significatifs ont été relevés sur les tâches de MT tandis qu'ils étaient très faibles voire absents sur d'autres tâches de transfert distant évaluant l'intelligence fluide, l'attention/l'inhibition, les mathématiques et la littéracie. Les auteurs ont également obtenus des résultats similaires à ceux de Melby-Lervåg & Hulme (2013), en montrant que les tailles d'effet étaient inversement liées à la qualité du design expérimental impliquant l'affectation aléatoire aux groupes et la présence d'un groupe contrôle actif. L'absence d'effet significatif des entraînements de MT sur les tâches de transfert distant a également été montré dans une méta-analyse incluant des enfants au développement typique de moins de 12 ans (Kassai et al., 2019). Sala & Gobet (2020) ont répliqué ces résultats dans une autre méta-analyse concernant des enfant typiques, en montrant en outre, que l'ampleur des effets des entraînements de MT sur les tâches de transfert proche était proportionnelle à la similarité entre la tâche d'entraînement et la tâche d'évaluation utilisée lors des temps de mesure.

Bharadwaj et al. (2022), ont aussi investigué l'efficacité des entraînements de MT chez les enfants au développement typique en incluant également dans leur méta-analyse des études conduites auprès d'enfants avec des troubles neurologiques ou neurodéveloppementaux. Les auteurs se sont focalisés sur 10 études qui avaient utilisé le programme Cogmed. Les données ont montré des effets significatifs sur les tâches de MT avec des tailles d'effet modérées. Cependant, les tailles d'effet étaient faibles concernant le maintien à long terme des changements. De plus, il n'y avait pas d'effet significatif sur les mesures évaluant l'attention, les fonctions exécutives et les résultats scolaires. Ainsi, même



en incluant des enfants avec des troubles neurologiques ou du neurodéveloppement, leurs résultats étaient globalement similaires aux précédentes méta-analyses concernant les enfants au développement typique.

Peijnenborgh et al. (2016) se sont focalisés plus précisément sur les enfants et les adolescents présentant des troubles des apprentissages. Dans leur méta-analyse, les auteurs ont inclus 13 études qui comportaient des groupes contrôles ainsi que des participants âgés de 5 à 17 ans avec des troubles des apprentissages dont le quotient intellectuel étaient supérieur à 80. Leurs données ont montré des effets significatifs des entraînements sur la MT verbale et visuo-spatiale ainsi que sur la lecture, avec un maintien des effets à long terme de 9 semaines à 8 mois. De plus, le type de groupe contrôle (groupe passif vs. groupe actif) n'avait pas d'effet modérateur sur les effets significatifs observés. Par ailleurs, l'âge était une variable modératrice, car les enfants plus âgés (plus de 10 ans) bénéficient davantage des entraînements que les enfants plus jeunes concernant la MT verbale. Cette méta-analyse menée exclusivement auprès d'enfants et d'adolescents avec des troubles des apprentissages a montré des résultats différents des méta-analyses citées précédemment. En revanche concernant le transfert distant sur les compétences en lecture, seulement 3 études sur 13 incluaient ces mesures. De plus, le degré de similarité entre les tâches d'entraînement et les tâches d'évaluation n'a pas été mesuré.

Ainsi, la plupart des méta-analyses qui incluaient des études avec des groupes contrôle ont montré que les entraînements informatisés de la MT avaient des effets à court terme sur les tâches proches de celles entraînées (transfert proche), mais qu'il n'y avait pas ou peu de transfert sur les apprentissages et les autres capacités cognitives (transfert distant). Bien que certaines études empiriques rapportent des effets significatifs des entraînements généraux de MT, il semblerait que ces effets soient en partie imputables à des biais méthodologiques tels qu'une absence de randomisation et/ou de groupe contrôle avec un entraînement alternatif. Certaines méta-analyses suggèrent même que les effets observés sur les tâches de transfert proche ne reflètent pas une augmentation des capacités de MT, puisque ces effets dépendent grandement du degré de similarité entre les tâches entraînées et les épreuves d'évaluation (Aksayli et al., 2019; Sala & Gobet, 2020).

Pour Gathercole et al. (2019), les effets des entraînements de MT seraient surtout en lien avec l'acquisition de nouvelles routines cognitives. Ces auteurs considèrent que l'entraînement de la MT peut conduire à un transfert significatif sur d'autres tâches, uniquement si les activités d'entraînement comportent de nouvelles exigences qui nécessitent le développement de nouvelles routines, pouvant ensuite être réutilisées dans des tâches non entraînées impliquant des paradigmes similaires. Gathercole et al. (2019) ont ainsi observé un transfert significatif de l'entraînement de MT lorsque les tâches entraînées et non entraînées partageaient un paradigme de rappel sériel, d'empan complexe ou d'empan envers. Par ailleurs, Norris et al. (2019) ont montré que l'entraînement au rappel sériel de chiffres présentés visuellement, améliorait les performances en rappel sériel de chiffres visuels mais pas le rappel de chiffres présentées auditivement ou de lettres présentées visuellement. En revanche, les participants qui avaient bénéficié d'un entraînement sur une tâche de détection de changement de couleurs en mémoire à court terme visuelle non sérielle amélioraient leurs performances sur une tâche de détection de changement d'orientation de lignes.

Il semblerait ainsi que l'approche fonctionnelle présente une efficacité limitée concernant l'amélioration des capacités de MT. Cependant, cette approche comporte plusieurs limites, notamment car elle ne prend pas en compte l'aspect modulaire des différents mécanismes qui sous-tendent la MT et la possibilité que ces mécanismes soient perturbés de façon sélective (Majerus, 2016). De plus, l'approche fonctionnelle se base sur les mesures de MT au sein du groupe qu'elle étudie, sans analyser les profils individuels des participants. Pourtant, il semblerait que les capacités initiales des participants influencent les effets de l'entraînement de la MT, puisque les individus avec une plus grande marge de progression montrent des améliorations plus importantes (von Bastian & Oberauer, 2014). Dans ce contexte, il est possible que certains participants au sein des groupes cliniques aient bénéficié d'un entraînement de la MT alors qu'ils ne présentaient pas de déficit dans ce domaine, ce qui pouvait ainsi limiter les effets de la remédiation à l'échelle du groupe.

## 2. L'approche cognitive

L'approche cognitive prend en compte l'aspect modulaire de la MT en ciblant ses différentes composantes qui peuvent être altérées de manière spécifique chez des personnes qui présentent des troubles neurologiques ou neurodéveloppementaux. Cette approche pourrait ainsi permettre de contourner les limites méthodologiques de l'approche fonctionnelle. En revanche, les études ayant utilisé l'approche cognitive en ciblant spécifiquement certains aspects de la MT restent rares chez les enfants (Majerus, 2021). C'est pourquoi cette section abordera des travaux menés à la fois chez les enfants et chez les adultes qui ont pris en compte les déficits spécifiques de MT de leurs participants afin de leur proposer une remédiation ciblée.

Delage et ses collaborateurs ont créé un programme d'entraînement adaptatif de la MT appelé « Magic Memory », qui propose des activités ciblant différents aspects de la MT (Stanford et al., 2019). La MT de l'ordre sériel est entraînée avec deux activités de reconstruction d'ordre sériel. Dans la première, une série de mots monosyllabiques familiers est énoncée (ex : hache, gant, poule, arbre), puis il est demandé aux enfants de placer les images correspondantes sur les wagons d'un train dans l'ordre correct de présentation initiale. Dans la seconde, des séries de noms de couleurs de longueur croissante sont énoncées puis il est demandé à l'enfant de cliquer sur les couleurs énoncées dans l'ordre correct de présentation. Même si cette activité est proche des tâches d'empan classiques, elle cible surtout la MT de l'ordre sériel car il s'agit de cliquer sur des stimuli familiers qui restent les mêmes (les couleurs) en fonction de leur ordre de présentation. Deux autres activités visent à la fois la MT de l'ordre sériel et le contrôle attentionnel. Dans la première, des sons de la vie quotidienne sont à écouter (ex : téléphone, pleurs d'un bébé, aboiement, notes de musique jouées à la guitare), avec des tâches visuelles de comparaison de quantités à réaliser entre chaque son comme tâche interférente. Il est ensuite demandé à l'enfant de placer les images qui correspondent aux sons écoutés dans leur ordre correct de présentation. Dans la deuxième activité, des séries de noms de couleurs de longueur croissante sont énoncées puis l'enfant doit cliquer sur les couleurs dans l'ordre inverse de présentation. Le contrôle attentionnel via la mise à jour en MT est également ciblé avec une adaptation de la tâche classique de n-back. Une série d'images défile sur l'écran et il s'agit de cliquer dès qu'un

élément identique a été présenté juste avant (1-back) ou jusqu'à deux ou trois éléments (2-back, 3-back) avant en fonction du niveau de difficulté.

Stanford et al. (2019) ont évalué l'efficacité de ce programme auprès de deux groupes d'enfants avec un TDL âgés de 5 à 12 ans. Chaque participant avec un TDL devait présenter un déficit sur au moins trois des six tâches de MT utilisées à l'évaluation proposée durant la phase d'inclusion. Le premier groupe d'enfants avec un TDL a bénéficié d'un entraînement avec Magic Memory pendant 8 semaines avec trois sessions de 30 minutes par semaine. Le second groupe d'enfants avec un TDL a participé à des activités informatisées de soutien scolaire à la même fréquence que le premier groupe. Après 12 heures d'entraînement, les enfants TDL ayant bénéficié de l'entraînement de MT ont montré des effets significatifs sur des tâches de MT non entraînées telles que la reconstruction d'ordre sériel, les empan de chiffres, la répétition de non-mots, les empan de chiffres envers ainsi que deux autres tâches d'empan complexe. En revanche, le groupe contrôle ayant bénéficié de soutien scolaire n'avait pas montré d'amélioration de ses performances. De plus, le groupe qui avait participé à l'entraînement de la MT montrait une évolution significative en syntaxe expressive à la différence du groupe contrôle. Plus précisément, les enfants ayant bénéficié de l'entraînement de MT produisaient plus de pronoms clitiques accusatifs à la troisième personne (le/les la/les) lorsqu'ils devaient répondre à des questions portant sur des images. Delage et al. (2020) ont également montré des évolutions significatives en répétition de phrases complexes. Les enfants avec un TDL qui avaient participé à l'entraînement de MT répétaient davantage de phrases complexes correctes en respectant mieux les structures syntaxiques ainsi que le degré d'enchâssement attendu. L'entraînement avec Magic Memory a eu aussi des effets significatifs sur le taux de syllabes correctement répétées chez les enfants avec un TDL (Delage et al., 2021). Delage et al. (2023) ont également étudié l'effet de leur programme d'entraînement de MT sur le langage spontané. Dans leur étude, les enfants avec un TDL qui avaient bénéficié de l'entraînement avec Magic Memory augmentaient leur taux de production de phrases complexes dans une tâche de narration et lors d'une conversation avec l'examineur. En effet, ils énonçaient davantage de phrases avec des enchâssements simples et multiples afin de produire des subordinées relatives. Ainsi, il semblerait qu'un entraînement ciblé de la MT de l'ordre sériel et du contrôle attentionnel puisse avoir des effets bénéfiques chez des enfants avec un TDL, avec un transfert sur certains domaines du langage

oral. En revanche, si ce programme présente l'intérêt de cibler à la fois à la MT de l'ordre sériel et le contrôle attentionnel, il est difficile de déterminer précisément si les enfants ont surtout bénéficié des activités ciblant la MT de l'ordre sériel, le contrôle attentionnel ou ces deux types d'activités.

## **2.1. La remédiation de la MT de l'item**

Plusieurs études ont exploré des interventions ciblant spécifiquement la MT de l'item. Certaines d'entre elles ont étudié l'entraînement à des stratégies de compensation des déficits de MT de l'item. Swanson et al. (2010) ont cherché à savoir si l'entraînement à une stratégie de récapitulation articulatoire pouvait améliorer les capacités de MT verbale chez des enfants avec ou sans trouble de la lecture. Cette stratégie de récapitulation articulatoire consistait en la répétition à voix haute autant de fois que possible des items à mémoriser jusqu'à leur restitution au moment du rappel. Bien que les performances des enfants s'amélioraient sur les tâches de MT verbale avec cette stratégie, les scores des enfants avec des troubles de la lecture restaient significativement inférieurs à ceux sans trouble de la lecture. Ces données suggèrent que même si la stratégie de récapitulation articulatoire permet aux enfants avec des troubles de la lecture de compenser une partie de leurs difficultés de MT sur des tâches spécifiques, elle n'augmente pas directement leurs capacités de MT. Closset et Majerus (2007) ont également développé une stratégie de compensation des déficits de MT de l'item auprès d'une enfant cérébrolésée de 10 ans. Les auteurs ont appris à l'enfant à se créer des images mentales visuelles afin de recoder les informations à mémoriser sur le plan visuel et sémantique. La première étape de la remédiation consistait en un entraînement à la mémorisation de suite d'images. Dans la seconde étape, il s'agissait d'entraîner l'enfant à générer des images mentales spontanément lors de la présentation auditive de liste de mots. L'évaluation cognitive après la rééducation montrait une normalisation des performances sur les empans de chiffres et de mots, tandis que le déficit de MT persistait pour les empans de non-mots qui ne pouvaient pas être recodés visuellement et sémantiquement. Une autre approche a été développée auprès d'un adulte cérébrolésé et visait une amélioration de l'accès aux représentations lexicales et sémantiques lors de la répétition de mots abstraits et peu fréquent (McCarthy et al., 2016). Il s'agissait d'enrichir le contexte sémantique de dix

noms avec un faible degré d'imagerie en les associant à des adjectifs sémantiquement proches dans des tâches de répétition. Les résultats ont montré une amélioration des performances du patient lorsqu'il lui était demandé de répéter ces mots quand ils étaient présentés de manière isolée. En revanche, aucun effet n'avait été observé pour la répétition d'items non entraînés. De plus, les performances du patient restaient déficitaires sur les tâches de répétition de mots et de non-mots ainsi que sur celles de reconnaissance d'empans. Ainsi, même si les stratégies de compensation des déficits de MT de l'item peuvent permettre d'améliorer voire de normaliser les performances sur certaines tâches de MT de l'item, il semblerait que cette approche n'augmente pas directement les capacités de MT. L'efficacité de ce type d'approche dépendrait également de la possibilité ou non pour le patient de réutiliser la stratégie en fonction du contexte dans lequel la MT est sollicitée. En effet, dans l'étude de Closset et Majerus (2007), la patiente présentait des performances dans les normes après la remédiation dans la tâche de rappel sériel immédiat impliquant des mots avec un degré d'imagerie élevé tandis que ses performances restaient altérées dans la tâche de rappel sériel immédiat impliquant des mots avec un faible degré d'imagerie. Ces résultats s'expliquent probablement par le fait que le codage sémantico-visuel était possible plus particulièrement pour les mots ayant un degré d'imagerie élevés et beaucoup moins pour les mots ayant un degré d'imagerie faible.

La remédiation de la MT de l'item peut aussi viser à restaurer le maintien à court terme des représentations phonologiques en MT (Majerus et al., 2016). Il s'agit de proposer un entraînement au maintien à court terme de l'item sémantique ou phonologique avec des exercices de répétition immédiate ou différée d'informations phonologiques (mots ou non-mots). Plusieurs travaux ont montré des effets significatifs de ce type d'approche chez des adultes cérébrolésés présentant une aphasie, le plus souvent à travers des études de cas unique qui permettaient de prendre en compte l'hétérogénéité des déficits de MT (voir Majerus, 2018, pour une revue détaillée). Francis et al. (2003) ont montré que des exercices intensifs de répétition de phrases pouvaient améliorer voire normaliser les performances d'un patient aphasique sur des tâches d'empans de chiffres, de rappel sériel de mots, de répétition de phrases et de compréhension de phrases alors qu'il n'y avait pas d'évolution significative sur les tâches contrôles devant rester stables (jugement de noms et synonymes, répétition de non-mots). Une autre étude a proposé un entraînement à la répétition de phrase différée et

montrait également qu'un patient améliorait ses performances en empan de chiffres et de mots, sur une tâche de reconnaissance de mots ainsi que pour la répétition de phrases (Koenig-Bruhin & Studer-Eichenberger, 2007). Berthier et al. (2014) ont aussi proposé à trois patients un entraînement à la répétition de phrases en comparaison à un entraînement contrôle. Par rapport à l'entraînement contrôle, les effets étaient plus importants après l'entraînement à la répétition de phrase sur des tâches de répétition de phrases, mais également de répétition de listes de mots et de non-mots. Un entraînement à la répétition immédiate puis différée de paires de non-mots bisyllabiques a par ailleurs été proposé pour cibler le maintien à court terme de l'item phonologique (Majerus et al., 2005). Après l'intervention, les auteurs ont observé chez la patiente, des performances qui se situaient dans les normes sur les tâches d'empan de chiffres, de mots et de non-mots, avec une évolution plus marquée pour les non-mots. Une amélioration avait également été relevée sur la répétition d'un seul non-mot, la répétition de mots de basse fréquence et le jugement de rimes. Il semblerait par ailleurs qu'il existe des procédures de remédiation de la MT de l'item qui cible de manière dissociée la MT de l'item phonologique (non-mots) et la MT de l'item sémantique (mots). Harris et al. (2014) ont exploré les effets spécifiques d'un entraînement de la MT de l'item chez deux patients. Les auteurs ont proposé à un premier patient un entraînement ciblant la rétention d'éléments phonologiques via la répétition immédiate de listes de non-mots, et à un second patient une intervention ciblant la rétention d'éléments sémantiques via la répétition immédiate de listes de mots. Les résultats ont montré que le patient ayant bénéficié d'un entraînement de la rétention d'items phonologiques améliorait davantage ses performances sur les tâches de MT de l'item phonologique par rapport au patient qui avait participé à une intervention sur la MT de l'item sémantique. A l'inverse, le patient qui avait bénéficié d'un entraînement de la MT de l'item sémantique montrait une plus grande amélioration sur les tâches de MT de l'item sémantique, par rapport au patient qui avait participé à une intervention sur la MT de l'item phonologique.

Plusieurs études ont ainsi montré des résultats en faveur de potentiels effets d'un entraînement au maintien à court terme de l'item sémantique ou phonologique en MT chez des adultes cérébrolésés. Toutefois, des données suggèrent qu'il paraît important de varier au maximum les stimuli verbaux utilisés dans les entraînements de MT de l'item afin de favoriser une généralisation des effets sur des tâches et des items non entraînés. Une étude de

Kalinyak-Fliszar et al. (2011) a proposé un entraînement à la répétition différée de 10 mots et de 20 non-mots à un patient présentant un déficit de MT de l'item phonologique et sémantique. Les résultats ont montré une amélioration significative sur les tâches de MT utilisant les mots et les non-mots entraînés. En revanche, les effets apparaissaient plus limités concernant les tâches de MT impliquant des stimuli qui n'avaient pas été ciblés durant l'entraînement, puisque les performances dans les tâches d'empan de mots et de non-mots restaient fortement altérées.

## **2.2. La remédiation de la MT de l'ordre sériel**

En ce qui concerne la remédiation des déficits de MT de l'ordre sériel, peu d'études ont ciblé spécifiquement cette composante de la MT. Ces rares études ne concernaient pas les personnes dyslexiques. Smith (2015) a proposé une stratégie de codage spatial, auprès de patients avec un syndrome de Down qui présentaient un déficit dans les tâches d'empans verbaux pour les aider à structurer spatialement le rappel sériel d'informations. Cette stratégie consistait à associer les mots d'une liste à mémoriser avec des objets positionnés au bord d'un chemin qui traversait le paysage de gauche à droite, en suivant l'ordre séquentiel des mots et l'alignement des objets de gauche à droite. Cette grille visuo-spatiale était également utilisée pour le rappel lorsque les participants devaient restituer de manière linéaire le mot qui était associé à chaque objet sur le paysage. Après cet entraînement, les patients ont montré une augmentation significative du nombre de mots correctement rappelés dans l'ordre sur les tâches d'empans verbaux.

Afin de contourner les déficits langagiers d'un patient présentant une aphasie, Salis (2012) a proposé des tâches d'entraînement de MT qui consistaient en la reconnaissance d'ordre sériel de séquences de mots. Il s'agissait de présenter des paires de séquences de mots dont l'ordre était soit identique, soit différent, et le patient devait déterminer si l'ordre des mots dans les deux séquences était identique ou non. Des effets significatifs ont été observés sur les tâches d'empans verbaux avec une normalisation des performances. En revanche, les effets étaient plus limités sur les tâches de compréhension de phrases. Une nouvelle étude a été menée auprès de 5 patients avec un matériel d'entraînement similaire (Salis et al., 2017). Les auteurs ont relevé des effets importants sur les tâches d'empans verbaux pour deux des



5 patients avec une aphasie. De plus, les effets étaient encore très limités sur les mesures de compréhension de phrases. Pour expliquer l'absence de transfert distant, les auteurs ont suggéré que les troubles de compréhension de phrases pouvaient être sous-tendus par d'autres déficits que des déficits de MT. De plus, les effets limités sur les tâches d'empans verbaux pour certains patients pourraient s'expliquer par une hétérogénéité des déficits de MT qui sous-tendent les performances dans les tâches d'empans verbaux dans l'aphasie comme cela a déjà été démontré (Majerus, Attout, Artielle, & Van Der Kaa, 2015). Ainsi, il est possible que certains des patients des études de Salis (2012) et de Salis et al. (2017) présentaient des difficultés sur les tâches d'empans verbaux plutôt en raison d'un déficit de MT de l'item. Dans ce contexte, il est cohérent qu'un entraînement à la reconnaissance de l'ordre sériel de séquences verbales n'améliore pas les performances de patients qui présentent un trouble plus sélectif de la MT de l'item. Par ailleurs, ces deux études ne permettent pas de déterminer les effets de ce type d'entraînement sur la MT de l'ordre sériel puisque ces deux études n'incluaient pas de mesure spécifique de cette composante de la MT.

### **2.3. La remédiation du contrôle attentionnel en MT**

Certains chercheurs ont exploré des stratégies de remédiation qui ciblent plus particulièrement les aspects attentionnels et exécutifs de la MT. Vallat et al. (2005) ont proposé à un adulte cérébrolésé des exercices de remédiation qui nécessitaient de stocker et de traiter simultanément des informations verbales en MT. Il s'agissait de tâches de reconstitution de mots à partir de l'épellation de l'orthographe à l'oral, de calcul du nombre de lettres paires et impaires dans un mot, d'assemblage de mots à partir de syllabes isolées, de rappel de listes de mots en classant les items dans l'ordre alphabétique, et de formation de nouveaux mots en assemblant le phonème initial d'une série de mots. Après la remédiation, les auteurs ont observé des effets de transfert proche sur les tâches d'empans verbaux et d'empans complexes. De plus, les performances du patient se situaient dans les normes sur les tâches de MT verbale. Des effets de transfert distants étaient également relevés sur les épreuves de résolution de problèmes arithmétique et sur les tâches de compréhension de phrases. Par ailleurs, une réduction significative des plaintes du patient dans la vie quotidienne après la remédiation a été objectivée dans un questionnaire

d'évaluation de la mémoire. Vallat-Azouvi et al. (2009) ont évalué l'efficacité d'une remédiation des aspects attentionnels de la MT en utilisant le même matériel que dans leur étude précédente, mais ajoutant également d'autres types d'exercices tels que des tâches de n-back en modalité visuelle et verbale ainsi que des tâches impliquant le stockage en MT d'informations visuo-spatiales. Les auteurs ont proposé cette remédiation à deux patients qui présentaient de légères difficultés sur une tâches d'empans de chiffres, des performances dans la norme sur les tâches d'empans visuels, mais un déficit sévère sur les tâches de MT impliquant un contrôle attentionnel tel que les épreuves d'empans de chiffres envers et la tâche verbale du paradigme de Brown Peterson. L'évaluation après l'intervention a montré une amélioration sur les tâches de MT impliquant le contrôle attentionnel, avec des performances qui correspondaient à la norme. Les auteurs ont également observé un transfert distant sur une épreuve de double tâche et de résolution de problèmes arithmétiques. Un questionnaire évaluant les conséquences des troubles cognitifs sur les activités de la vie quotidienne a par ailleurs montré une diminution des problèmes d'attention au quotidien. En revanche, il n'y a pas eu d'amélioration des mesures d'attention et de MLT non ciblées par la remédiation. Les auteurs précisent toutefois que les patients ont montré un effet plafond sur certaines de ces tâches laissant ainsi peu de possibilités d'amélioration.

### **3. La remédiation de la mémoire de travail dans la dyslexie**

Plusieurs études ont été menées afin d'évaluer l'efficacité d'une remédiation de la MT dans dyslexie. Luo et al. (2013) ont mené une étude auprès de trente enfants dyslexiques âgés de 8 à 11 ans et résidant en Chine. Un entraînement adaptatif de la MT avec des activités ciblant à la fois, la MT verbale et visuo-spatiale ainsi que le contrôle attentionnel en MT a été proposé à un premier groupe 40 minutes par jour pendant 5 semaine. Le groupe contrôle participait à un entraînement de MT qui était non adaptatif qui durait moins de 10 minutes par jour. Les résultats ont montré que l'entraînement adaptatif de MT améliorait de manière significative les performances dans les tâches de MT non entraînés qui concernaient la MT verbale, la MT visuo-spatiale mais également le contrôle attentionnel en MT. Des effets significatifs de l'entraînement ont également été relevé sur une tâche de rimes et une tâche de lecture. De plus, les auteurs ont observé que les progrès réalisés sur les mesures de MT

étaient corrélés à l'évolution des compétences de lecture. Une autre étude a exploré l'efficacité d'un entraînement de la MT chez des enfants dyslexiques chinois (Yang et al., 2017). Un premier groupe d'enfants a bénéficié d'un entraînement à des tâches de n-back en modalité verbale tandis qu'un second groupe participait à un entraînement à des tâches de n-back en modalité visuelle. Un troisième groupe contrôle effectuait des sessions de jeux vidéo. Les résultats ont montré qu'en comparaison au groupe contrôle, les enfants qui avaient bénéficié de l'entraînement en modalité verbale augmentaient significativement leurs performances sur une tâche de jugement de rime tandis que le groupe qui avait participé à l'entraînement de MT en modalité visuelle s'améliorait sur une tâche de décision orthographique. Toutefois, les résultats des études menées auprès d'enfants résidant en Chine sont difficilement généralisables à l'ensemble des enfants dyslexiques en raison de la spécificité du système alphabétique chinois.

Lotfi et al. (2020) ont étudié les effets d'un entraînement adaptatif de la MT en modalité visuo-spatiale. Un groupe d'enfants dyslexiques participait à l'entraînement de MT tandis que le groupe contrôle était sur liste d'attente. Les auteurs ont observé que le groupe expérimental avait montré des améliorations significatives jusqu'à 6 mois sur des tâches d'attention visuelle et de MT visuo-spatiale par rapport au groupe de contrôle. Les effets sur les performances en lecture n'étaient pas significatifs directement après l'entraînement mais le devenaient 6 mois après l'entraînement. La portée de ces résultats pourrait toutefois être limitée en raison de l'absence de groupe contrôle ayant bénéficié d'un entraînement alternatif. De plus, d'autres études ont montré des résultats plus nuancés. Shiran & Breznitz (2011) ont proposé le programme informatisé Cognifit (2004) auprès d'adultes normo-lecteurs et d'adultes dyslexiques. Ces participants étaient appariés à un groupe d'adultes normo-lecteurs et à un groupe d'adultes dyslexiques qui ont suivi un programme d'apprentissage de la lecture. Le programme Cognifit comporte essentiellement des exercices d'empans visuels, verbaux et visuo-spatiaux. Les auteurs ont relevé une amélioration des performances de MT et de lecture dans des groupes d'adultes qui avaient participé à l'entraînement de MT. Cependant, les performances des personnes dyslexiques restaient inférieures à celles du groupe de normo-lecteur suggérant davantage des effets d'apprentissages ou de tests-retest plutôt qu'une amélioration des capacités de MT. Dans une autre étude réalisée auprès d'enfants dyslexiques et d'enfants normo-lecteurs, Maehler et al.,

(2019) ont utilisé un entraînement composé d'activités de MT verbale et visuo-spatiale et ciblant également le contrôle attentionnel en MT. Les résultats ont montré que les faibles effets significatifs sur les tâches de MT ne se maintenaient pas sur le long terme.

# PARTIE EXPERIMENTALE ET CLINIQUE

## Objectifs et hypothèses

Plusieurs données empiriques suggèrent que les représentations phonologiques stockées en MLT sont préservées chez les personnes dyslexiques. Les troubles phonologiques observés dans la dyslexie correspondraient ainsi davantage à un déficit d'accès aux représentations phonologiques, lorsqu'il est nécessaire de s'appuyer sur d'autres capacités cognitives telles que la MT pour mobiliser des représentations phonologiques. Par ailleurs, alors que les premières modélisations de la MT montraient surtout des difficultés au niveau de la boucle phonologique du modèle de Baddeley, d'autres travaux s'appuyant sur des modèles théoriques plus récents évoquent des déficits attentionnels et des troubles de la MT de l'item et de l'ordre sériel. Certains résultats soutiennent l'hypothèse d'une relative indépendance entre les déficits phonologiques, de MT de l'item, de MT de l'ordre sériel et d'attention. Cependant, d'autres études sont en faveur de relations bidirectionnelles entre ces différents processus. De plus, dans le cadre de la dyslexie, la nature des interactions entre les troubles phonologiques et la MT est difficile à déterminer, notamment car les mécanismes qui permettent le maintien de l'information verbale en MT dépendent eux-mêmes des représentations phonologiques stockées en MLT (Majerus & Cowan, 2016).

En ce qui concerne les difficultés dans les tâches phonologiques, elles peuvent aussi bien refléter un trouble spécifique d'accès aux représentations phonologiques qu'un déficit de maintien et/ou de traitement des informations phonologiques en MT (chapitre 1). Concernant les troubles de MT de l'item, il est possible qu'ils soient simplement la conséquence des troubles phonologiques des personnes dyslexiques (chapitre 2). En revanche, compte tenu des troubles attentionnels observés dans la dyslexie et de l'implication de ces processus dans le maintien des informations phonologiques en MT, il est difficile d'exclure totalement que les troubles de la MT de l'item soient consécutifs à un déficit attentionnel. Par ailleurs, certains résultats suggèrent un déficit de MT de l'item en lien avec un trouble spécifique du maintien des représentations phonologiques en MT, indépendamment des troubles phonologiques (Kibby et al., 2004; Mundy & Hannant, 2020). Les mécanismes qui sous-tendent les troubles de la MT de l'ordre sériel dans la dyslexie

peuvent également être questionnés. Si plusieurs études ont montré que ce déficit de MT était relativement indépendant des troubles de la MT de l'item, le rôle des difficultés attentionnelles des personnes dyslexiques dans les troubles de MT de l'ordre sériel n'a pas encore été exploré. En ce qui concerne les déficits dans les tâches de contrôle attentionnel en MT, ils pourraient être la conséquence des troubles de MT de l'item des personnes dyslexiques comme l'ont suggéré plusieurs auteurs. Plus précisément, en raison de leurs déficits de MT de l'item, les ressources attentionnelles des personnes dyslexiques seraient en quelque sorte « saturées » dans les tâches d'empans complexes impliquant le maintien et le traitement d'informations phonologiques. D'autres chercheurs considèrent toutefois que le déficit du contrôle attentionnel en MT pourrait constituer un trouble distinct et spécifique dans la dyslexie (Beneventi et al., 2010; S. Wang & Gathercole, 2013). Le premier objectif de cette thèse est de préciser la nature des troubles de MT les enfants dyslexiques ainsi que leurs interactions avec les processus attentionnels et certaines habiletés phonologiques. La première et la deuxième étude ont été menées en lien avec cet objectif.

Concernant la remédiation de la MT, de nombreuses études ont montré une très faible voire une absence d'efficacité des entraînements de MT chez des adultes et des enfants au développement typique ou atypique. Les résultats sont semblables concernant les enfants présentant une dyslexie. Cependant, la plupart des travaux ont utilisé une approche fonctionnelle de la remédiation de la MT et présentaient certaines limites. Premièrement, les programmes d'entraînement ne prenaient pas en compte les avancées théoriques concernant la distinction entre la MT de l'item et la MT de l'ordre sériel. Deuxièmement, les procédures d'entraînement ne ciblaient pas une composante spécifique de la MT, alors que les différents aspects de la MT peuvent parfois être altérés de manière sélective (Majerus, 2016). Il semble ainsi cohérent qu'une personne qui participe à un entraînement basé sur la MT de l'item alors qu'elle présente un déficit de MT de l'ordre sériel ne montre pas d'amélioration de ses capacités de MT. Troisièmement, concernant les études menées auprès de personnes avec des troubles neurodéveloppementaux, les participants étaient inclus en fonction de leur diagnostic (e.g : TDA/H, dyslexie) et non en fonction de la présence d'un trouble de la MT. Ainsi, il n'est pas surprenant qu'une personne qui participe à un entraînement de MT n'améliore pas significativement ses performances si ses capacités de MT sont déjà efficaces. En revanche, certaines études ayant contourné ces limites méthodologiques en utilisant une

approche cognitive suggèrent qu'il est possible d'observer des effets significatifs d'une remédiation de la MT avec un transfert sur d'autres domaines tel que le langage oral. Toutefois, comme ces résultats ont été obtenus auprès d'adultes cérébrolésés et d'enfants présentant un TDL, nous ignorons si les effets pourraient être similaires chez des enfants dyslexiques. Ainsi, il est difficile de déterminer si les résultats peu probants concernant l'efficacité d'une remédiation de la MT chez les personnes dyslexiques sont liés aux limites méthodologiques évoquées précédemment ou s'ils reflètent simplement des déficits de MT persistants malgré la mise place d'interventions. Le second objectif de cette thèse est donc d'explorer la potentielle efficacité d'une remédiation ciblée de la MT dans la dyslexie. La troisième étude est associée à ce second objectif.

**La première étude** de la thèse vise à mieux comprendre la nature des troubles de MT de l'item et de l'ordre sériel, ainsi que leurs interactions avec les habiletés phonologiques, notamment afin d'évaluer la pertinence de proposer une remédiation ciblée de la MT dans la dyslexie. Pour cela, nous avons exploré certaines habiletés phonologiques ainsi que la MT de l'item et de l'ordre sériel chez des enfants dyslexiques, en nous focalisant spécifiquement sur les profils individuels de MT et d'habiletés phonologiques. Il s'agissait de déterminer dans quelle mesure les troubles phonologiques ainsi que les déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel pouvaient être dissociés chez les enfants dyslexiques. Nous avons également procédé à des analyses au niveau des groupes afin de comparer les performances des enfants dyslexiques à celles d'enfants au développement typique. D'une part, nous avons exploré l'hypothèse selon laquelle le déficit de MT de l'item est uniquement la conséquence des troubles phonologiques des enfants dyslexiques. D'autre part, il s'agissait d'étudier à l'inverse, si les troubles phonologiques des personnes dyslexiques pouvaient être sous-tendus par un déficit de maintien des informations phonologiques en MT de l'item. Les capacités de MT de l'item et de l'ordre sériel ont été mesurées à l'aide de tâches qui permettent de distinguer ces deux aspects de la MT (Leclercq & Majerus, 2010 ; Majerus et al., 2015 ; Martinez Perez et al., 2012, 2013). Concernant la MT de l'item, il s'agissait d'une tâche de répétition différée d'un seul item ainsi que des scores de rappel d'items pour des listes de mots et de non-mots dans une tâche de rappel sériel immédiat (RSI). Les capacités de MT de l'ordre sériel ont été mesurées avec une tâche verbale et non verbale de reconstruction de l'ordre sériel et avec des scores de rappel de l'ordre pour la tâche de rappel sériel immédiat. Les habiletés

phonologiques ont été évaluées à l'aide de deux tâches distinguant le traitement perceptif et la conscience phonologique. Les capacités perceptives phonétiques ont été évaluées en utilisant deux tâches de discrimination de paires de syllabes. La conscience phonologique a été évaluée à l'aide de tâches de suppression de phonèmes.

**La seconde étude** complète l'étude précédente, en visant à préciser la nature des déficits attentionnel en MT dans la dyslexie, ainsi que leur interaction avec les troubles phonologiques, de MT de l'item et de MT de l'ordre sériel. Nous avons utilisé des tâches évaluant les processus attentionnels en distinguant le focus attentionnel du modèle de Cowan (1999) et le contrôle attentionnel. Les capacités de contrôle attentionnel ont été mesurées avec une épreuve d'empan de chiffres envers et grâce au paradigme développée par Portrat et al. (2009) dans une tâche d'empan complexe permettant de déterminer la sensibilité à la charge cognitive. Concernant le focus attentionnel, il s'agissait d'évaluer la sensibilité à la charge de MT lors de l'augmentation du nombre d'items à mémoriser dans la tâche de Portrat et ses collaborateurs (2009). Nous avons également utilisé une tâche d'empan VA (Valdois et al., 2017) qui pourrait s'apparenter aux mesures du focus attentionnel, notamment car la courte durée de présentation des stimuli ne permet pas une répétition des items. Les performances du groupe d'enfants dyslexiques ont été comparées à celles d'un groupe contrôle. D'une part, nous avons examiné s'il existait des troubles des processus attentionnels en MT chez les enfants dyslexiques de manière spécifique et distincte des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel. D'autre part, il s'agissait d'étudier l'implication des processus attentionnels concernant les troubles phonologiques, mais également les déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel.

**La troisième étude** vise à explorer l'efficacité d'une remédiation ciblée de la MT chez des enfants dyslexiques. Il s'agissait notamment de créer et de tester deux procédures de remédiation distinctes afin de cibler d'une part la MT de l'ordre sériel et d'autre part la MT de l'item. Nous avons étudié si un entraînement au maintien de l'information phonologique en MT associé à une stratégie de RA et de codage visuel des informations phonologiques pouvait améliorer les capacités de MT de l'item phonologique. Il s'agissait également d'examiner si un entraînement au maintien de l'ordre sériel associé à une stratégie de codage spatial de l'information sérielle pouvait augmenter les capacités de MT de l'ordre sériel. Enfin, nous avons investigué les effets de ces remédiations sur les apprentissages tels que la lecture, le



calcul mental et la résolution de problèmes. Afin de prendre en compte l'hétérogénéité des déficits de MT dans la dyslexie, nous avons procédé à une étude de cas multiples incluant quatre adolescents dyslexiques. Deux adolescents ont participé à une remédiation visant leur déficit de MT de l'item tandis que deux autres adolescents ont bénéficié d'un entraînement ciblant leur trouble de la MT de l'ordre sériel. Nous avons étudié les effets des deux types de remédiation en calculant des tailles d'effet individuel issus de lignes de base et en comparant les z-scores des participants avant et après l'intervention. Plusieurs tâches ont été utilisées afin de distinguer les effets liés au transfert proche, au transfert intermédiaire et au transfert distant. Nos lignes de base comportaient également des tâches contrôles pour lesquelles aucun effet ne devait être attendu.



# ETUDE 1: Heterogeneity of short-term memory deficits in children with dyslexia

Ce texte est la reproduction d'un article publié :

Wokuri, S., Gonthier, C., Marec-Breton, N., & Majerus, S. (2023). Heterogeneity of short-term memory deficits in children with dyslexia. *Dyslexia*, 1-23. doi: 10.1002/dys.1749

## 1. Introduction

Developmental dyslexia is characterized by severe and persistent difficulties with accurate or fluent word recognition and spelling despite adequate instruction, intelligence and sensory abilities (Peterson & Pennington, 2015). A common explanation of this neurodevelopmental disorder involves a phonological processing deficit (Ramus et al., 2013). However, developmental dyslexia is also characterized by short-term memory (STM) impairment (Gathercole et al., 2016; Jeffries & Everatt, 2004; Menghini et al., 2011; Tiffin-Richards et al., 2008), and several recent studies have suggested that this impairment may concern more particularly the serial order aspects of STM, in both verbal and visuo-spatial domains (Majerus & Cowan, 2016). These STM deficits in dyslexia are well documented at the group level, however data in children with dyslexia exploring individual differences are much less abundant. Furthermore, due to the heterogeneity of the results obtained in the group studies and the methodological differences, the question of whether individual profiles underlie the group differences remains open for debate. The aim of the present study is to investigate item and serial order STM abilities in children with dyslexia, by examining both group-level and individual profiles, and to further examine the potential heterogeneity of STM deficits in dyslexia.

### The distinction of item versus serial order information in STM

At the theoretical level, several models of STM consider that the temporary storage of item information (item STM) and the storage of serial order information (serial order STM) are supported by distinct mechanisms (Attout et al., 2018; Burgess & Hitch, 1999, 2006). Item STM involves the storage of the verbal items as well as their phonological and lexico-semantic

characteristics, and as such, is considered to interact strongly with the language knowledge base (Majerus, 2009; Saint-Aubin & Poirier, 1999). In contrast, serial order STM allows for the storage of the serial order in which items were presented, and serial order coding has been proposed to rely on spatial, temporal, or other contextual codes (van Dijck et al., 2013 ; Abrahamse et al., 2014). The item-order distinction is also supported at the neural level, with distinct fronto-temporal and fronto-parietal networks supporting item and serial order coding in STM (Attout et al., 2019; Kalm & Norris, 2014; Majerus et al., 2010; Marshuetz et al., 2000; Papagno et al., 2017). Dissociations between serial order STM and item STM capacity have also been observed in children and adults with different neurodevelopmental and neurological disorders (Majerus et al., 2015; Schraeyen et al., 2019). The distinction between item and serial order STM abilities has important functional implications as serial order STM has been shown to be a specific predictor of lexical and reading abilities, as compared to item STM (Leclercq & Majerus, 2010; Martinez Perez et al., 2012; Ordonez Magro et al., 2020, 2021), and this particularly for the early phase of reading acquisition when reading is still characterized by a sequential, letter-by-letter decoding strategy. It thus appears important to examine the nature of item vs. serial order STM impairment in dyslexia, as the presence of serial order STM impairment may further hinder reading acquisition in this population.

### **Phonological and STM deficits in dyslexia**

Phonological processing involves a set of different cognitive processes, from speech perception to metacognitive processes such as phonological awareness (Loucas et al., 2016). The lowest level of phonological processing corresponds to the automatic perception of phonetic and phonological features of speech stimuli (Gombert, 1992). It is typically assessed via minimal pair discrimination tasks, when individuals have to recognize whether two verbal stimuli differ or not at the phonetic level (Le Jan et al., 2011). The highest level corresponds to meta-phonological processing, characterized by explicit cognitive control over phonological units. Phonological awareness is generally assessed via spoonerisms, phonemic segmentation or phoneme deletion tasks (Gombert, 1992).

The phonological deficit hypothesis considers that dyslexia is the result of dysfunctional phonological representations or processes (Thomson & Goswami, 2008). Ramus and Szenkovits (2008) argued that phonological impairment in dyslexia corresponds to meta-

phonological difficulties, which they referred to as a phonological access deficit, when individuals have to do explicit and complex mental manipulations on speech sounds with a high short-term memory load. Also note that phonological deficits are not necessarily restricted to dyslexia. McArthur et al. (2000) showed that comorbidity between developmental language disorder and dyslexia is frequent (nearly 50%), with phonological awareness deficits in both cases (De Groot et al., 2015). At the same time, some studies have shown that phonological processing impairments were nevertheless more strongly associated with dyslexia than with developmental language disorder (Catts et al., 2005; Spanoudis et al., 2019). McArthur and Castles (2013) observed that dyslexic children showed a deficit in phonological discrimination and phonological awareness, but not children with only a developmental language disorder. Nithart et al. (2009) also observed opposed profiles, with both groups presenting impairment of phonological awareness while children with developmental language disorder also presented a deficit for speech perception as revealed by a phonetic discrimination task.

Regarding STM more specifically, deficits in verbal STM are frequently shown in dyslexic individuals (Berninger et al., 2009; Gathercole et al., 2006; Peng et al., 2018; Swanson et al., 2009, 2010; Wang & Gathercole, 2013). A number of authors consider that these deficits are the consequence of the phonological processing deficit that characterizes dyslexia (Kibby et al., 2004). Studies distinguishing serial order and item STM components provide a more nuanced view. Perez et al. (2012) administered to children with dyslexia a single nonword repetition task to assess the storage of phonological item information and a serial order reconstruction task to assess serial order STM. The authors observed both item and serial order STM deficits, nevertheless these deficits appeared to be independent. Children with dyslexia presented a serial order STM deficit relative to both chronological age and reading age matched control groups while the item STM deficit was only observed relative to the chronological age matched control group. Both item and serial order STM impairments were also observed by Staels & Van Den Broeck (2014) in children with dyslexia, but, using different analyses, they did not find evidence for an independence of both types of STM impairment. Their results thus raised questions about the specificity of the serial order STM deficits in dyslexia. A more recent study observed again specific serial order STM deficits in dyslexia, and

this for both verbal and nonverbal serial order STM tasks while verbal item STM was preserved (Hachmann et al., 2020).

Studies distinguishing order and item STM components have also been conducted in adults with dyslexia. Martinez Perez et al. (2013) showed independent STM impairment in dyslexic adults for item STM and serial order STM components in the verbal domain. In contrast, one study suggested that serial order and item STM deficits were inconsistent in university students with self-reported dyslexia (Wang et al., 2016). Schraeyen et al. (2019), using a nonword repetition task, furthermore showed that poor performance of dyslexic individuals on this task was characterized by serial order errors (phoneme migration errors) rather than phoneme identity errors. Similar findings were observed by Romani et al. (2015) for the visual STM domain, with specific difficulties for sequential vs. simultaneous presentation formats of memoranda.

Studies conducted in children and in adults with dyslexia have directly compared verbal and visual STM tasks and provided evidence for serial order STM deficits in both domains (Cowan et al., 2017; Hachmann et al., 2014; Laasonen et al., 2012), with furthermore, at the neural level, reduced involvement of intraparietal cortices in the right hemisphere (Martinez Perez et al., 2015).

In sum, a large amount of studies have highlighted STM impairment in dyslexic individuals. These deficits appear to involve impairment at both item and serial order levels of STM, at least at the group level. At the same time, the question of the specificity of these deficits remains unclear, with some inconsistency regarding the presence of serial order STM deficits, raising the question of a possible heterogeneity of the nature of STM deficits in dyslexia. On the one hand, given the dependency of verbal item STM on phonological processing abilities (Majerus, 2009; Saint-Aubin & Poirier, 1999) and given the high prevalence of phonological processing deficits in dyslexia (Catts et al., 2005), we may expect a high proportion of children with dyslexia presenting also with verbal item STM deficits. Martinez Perez et al. (2012) indeed showed a strong correlation between verbal item STM and phonological awareness abilities in typically developing children. On the other hand, serial order STM deficits may either be an associated deficit going in parallel with item STM deficits,

with difficulties in encoding item information also leading to difficulties in encoding order information. Alternatively, serial order STM deficits may present an additional deficit whose severity is independent of the severity of the item STM. The latter situation is particularly important to consider given that, as noted earlier, previous studies have shown that serial order STM abilities are an important predictor of verbal learning abilities, including the early stages of reading acquisition (Leclercq & Majerus, 2010; Martinez Perez et al., 2012; Ordonez Magro et al., 2020, 2021). If the latter situation is observed, then the serial order STM impairment could be considered to be an additional factor contributing to the reading acquisition difficulties in children with dyslexia. In that case, treatment strategies of dyslexia should also target specifically serial order STM abilities, particularly for those children presenting with specific deficits for this aspect of STM. On the other hand, if the item STM deficit is predominant and goes in parallel with phonological processing deficits, treatment strategies focusing on phonological processing abilities may be sufficient, item STM being dependent on phonological processing abilities. In other words, in order to determine optimal treatment strategies, it is important to understand the individual STM profiles of children with dyslexia.

### **The current study**

The present study re-examined item and serial order STM as well as phonological processing abilities in children with dyslexia by focusing specifically on individual STM profiles in order to determine the extent to which item and serial order STM deficits are associated or can dissociate in children with dyslexia. However, for sake of comparison with previous studies that focused exclusively on group-level analyses, we additionally provide group-level analyses.

Item and serial order STM abilities were measured using tasks that have been shown to distinguish these two aspects of STM in previous studies in children and adults with or without dyslexia (Leclercq & Majerus, 2010; Majerus et al., 2015; Martinez Perez et al., 2012, 2013). At the item level, these tasks included a single item delayed repetition task as well as item recall scores for word and nonword lists in an immediate serial recall task. Serial order retention and recall abilities were measured via a serial order reconstruction task as well as order recall scores for the immediate serial recall task. Furthermore, we added a visual serial order reconstruction task in order to determine the existence of a possible domain-general

deficit in serial order STM abilities, as discussed above. Phonological processing was assessed with two tasks distinguishing perceptual processing from metaphonological awareness. Phonetic perceptual abilities were assessed via two minimal pair discrimination tasks. Metaphonological awareness was assessed using phoneme deletion tasks.

Given that the aim of this study was to examine phonological and STM deficits and their prevalence and heterogeneity at the individual level rather than determining core and potentially causal deficits of dyslexia, we compared our sample of dyslexic children to participants that were individually matched on age, nonverbal reasoning and receptive vocabulary (but not reading level).

## 2. Method

### Participants

Sixty native French-speaking children initially participated in the present study, but five dyslexic children were subsequently excluded due to failure to meet the inclusion criteria. Of these five children, two had comorbid developmental language disorder according to the speech and language assessment report. Two other children had ADHD comorbidity and one had an abnormal range non-verbal IQ as measured by the Raven Colored Matrices.

The final sample comprised a group of 25 dyslexic children (14 boys and 11 girls; age  $M = 146.9$  months,  $SD = 17.6$ ), compared to a group of 30 control children without reading disorders (17 boys and 13 girls; age  $M = 146.9$ ,  $SD = 20.1$ ). All dyslexic children had received a formal diagnosis of dyslexia by practitioners (ie. speech therapist, neuropsychologist, neuropediatrician or school doctor). In addition, as shown in **Table 1**, their reading age was at least 18 months below their chronological age according to a standardized French reading test (Lefavrais, 2005). The dyslexic children and the control children were individually matched on age,  $t(53) = 0.001$ ,  $p = .999$ , nonverbal reasoning (Raven et al., 1998),  $t(53) = 1.88$ ,  $p = .064$ , and receptive vocabulary (Dunn et al., 1993),  $t(53) = 1.731$ ,  $p = .089$ , but differed on reading



age as expected,  $t(53) = 13.12$ ,  $p < .001$ . The characteristics of both groups are shown in **Table 1**.

All participants were Native French speakers and attended a regular school setting in France. Participants were recruited from schools in the regions of Normandy and Brittany. In these schools, dyslexic children were recruited from special programmes for students with specific learning disorders. Socio-economic status was determined based on the parents' profession and the INSEE (2020) classification. 48% of the mothers of children with dyslexia were classified as "managers and higher intellectual professions" compared to 36% of the mothers in the control group, and 52% of the mothers of children with dyslexia were classified in the other categories (craftsmen, intermediate professions, employees, workers) compared to 63% in the control group., 56% of the fathers of children with dyslexia were classified as "managers and higher intellectual professions" compared to 40% of the fathers in the control group, and 44% of the fathers of children with dyslexia were classified in the other categories (craftsmen, intermediate professions, employees, workers) compared with 60% in the control group. Professions associated with higher socio-economic status were slightly more frequent in the group of children with dyslexia. A parental questionnaire and a retrospective analysis of the medical records including multidisciplinary assessments were used for the information about children's hearing/vision/and ADHD/psychiatric history. All children had normal or corrected-to-normal vision, normal hearing level and none of them presented a history of neurological, psychiatric disorder, or attention-deficit hyperactivity disorder. Children with a comorbid language impairment were excluded from the study, based on the speech therapists' language assessment reports provided to us by the parents. A note detailing the procedure of the study was provided to all participants and their parents. Informed consents were obtained from children and parents before the children participated in the study. The present study complies with the terms defined by the World Medical Association in the Declaration of Helsinki regarding ethical principles applicable to research involving human beings, as well as with the specific ethical and legal procedures regarding psychological experiments of the Université Rennes 2.

**Table 1.**

Characteristics of the dyslexic and control groups (means and standard deviations).

	Dyslexics	Controls
Chronological age (years;months)	12;2 (1;5)	12; 2 (1;8)
Reading age (years;months)	7;9 (1;2)	12;4 (1;4)
Nonverbal reasoning (standardized score)	100.1 (11.5)	105.9 (11)
Receptive vocabulary (standardized score)	111.3 (10.4)	116.3 (10.7)

## Materials

### *Background Tasks*

General nonverbal reasoning abilities were measured using Raven's Colored Progressive Matrices (Raven et al., 1998). This task has a high internal consistency test-retest reliability (Cronbach  $\alpha$ : .85-.93; Abdel-Khalek, 2005). The standardized scores were used. The *Echelle de Vocabulaire en images Peabody* (Dunn et al., 1993) was administered to control for receptive vocabulary knowledge; this scale is a French adaptation of the Peabody Picture Vocabulary Test. We used standardized vocabulary scores. This task has high test-retest reliability ( $R = .80$ ; Dunn & Theriault-Whalen, 1993). The standardized French reading test « Alouette-R » (Lefavrais, 2005) estimated reading level. This test requires reading a text composed of 265 words and containing many low-frequency words. Children were requested to read the text as fast and accurately as possible. A reading accuracy score and a reading speed score were calculated, and they were additionally converted into reading age in months, based on the normative data provided by Lefavrais (2005).

### *Phonological processing*

Phonetic perception was assessed via two versions of a minimal pair discrimination task (Attout et al., 2012; Majerus et al., 2005; Majerus et al., 2015). Fifty-six pairs of nonsense CV syllables were presented via headphones, at standard (28 pairs) or accelerated (stimuli generated via the TD-PSOLA<sup>®</sup> algorithm implemented in Praat) (28 pairs) speech rates for the two versions. In each condition, fourteen pairs were identical (e.g./ra-ra/) and fourteen pairs

had a different initial consonant. When the initial consonants were different, they differed by one phonetic feature, either voicing (10 pairs) (e.g., /pa-ba/) or place of articulation (18 pairs) (e.g., /ta-pa/). The vocalic context remained constant for all pairs (/a/). All stimuli had been recorded by a female native French speaker. The children were asked to listen carefully to each syllable pair and to determine whether they are identical or not by responding “yes” or “no”. The dependent variable used for the group-level analyses was the proportion of correct responses over the two versions of the entire task, with an internal consistency reliability of  $\alpha = .64$ . For individual-level analyses, the scores for the two versions were considered separately in order to compute composite z-scores reflecting the individual level of deficit in the most representative manner (see below).

Phonological awareness was assessed via a phoneme deletion task taken from the EVALEC computerized battery designed to assess reading and phonological processing skills (Sprenger-Charolles et al., 2005). Children listened to a nonword and had to delete the first sound and pronounce the remaining part of the nonword. Thirty-four pseudowords were presented via headphones, including 10 tri-syllabic pseudowords, 12 monosyllabic pseudowords with a consonant-vowel-consonant structure (C-V-C), and 12 monosyllabic pseudowords with a consonant-consonant-vowel structure (C-C-V). This task included a tri-syllabic nonword score, a monosyllabic nonword C-V-C score and a monosyllabic nonword C-C-V score. Again, the dependent variable used for the group-level analyses was the proportion of correct answers on the thirty-four nonwords of the task with an internal consistency reliability coefficient of  $\alpha = .77$ , while the scores for three subconditions were considered separately for the computation of composite z-scores for individual level analyses (see below).

### ***STM for item information***

STM for item information was assessed using two tasks. The first task was an item delayed repetition task (Leclercq & Majerus, 2010; Majerus et al., 2006; Majerus, Poncelet, Greffe, et al., 2006). A total of 30 single monosyllabic nonwords were presented separately via headphones to the children. At the end of each stimulus, the children had to repeat the nonword to confirm that they had correctly perceived the item and immediately after they were instructed to count in steps of 2 for 6 seconds. Then the experimenter asked the children

to repeat the stimulus. This task was administered using Open Sesame (Mathôt et al., 2012). The dependent variable was the proportion of nonwords correctly repeated after the 6 seconds delay. High test–retest reliability estimates were obtained for the item delayed repetition task by Majerus, Poncelet, Greffe, et al. (2006), where the test–retest correlation was .74. This task was designed to maximize the processing demands of phonological item information and to reduce serial order requirements given that a single, unfamiliar, monosyllabic item had to be repeated.

The second task was an Immediate Serial Recall (ISR) task for word and pseudoword lists. Children were asked to recall lists of words and pseudowords in the same order as during their presentation. The words were mono-syllabic (C-V-C), with a mean lexical frequency of 127.80 (range 0.73 to 523) (New et al., 2004) and a mean imageability rating of 5.10 (range 1.60 to 6.70) based on a rating scale ranging from 1 (low) to 7 (high) (Bonin et al., 2011). The pseudowords were also mono-syllabic (C-V-C), with a mean phonotactic frequency of 771.10 (range 12 to 3318) for diphones CV and a mean of 788 (range 17 to 2555) for diphones VC. These phonotactic frequencies were determined using the French phonetic database by Tubach and Boë (1990). In total, 32 lists were presented ranging from 2 to 5 items in length, with four lists per sequence length. The lists were presented auditorily at the rate of one item every 1 second. The item recall measure was calculated by determining the proportion of items correctly recalled independently of their serial position, relative to the total number of items to be recalled, with an internal consistency reliability coefficient of  $\alpha = .71$  in ISR task for nonwords and an internal consistency reliability coefficient of  $\alpha = .74$  in ISR task for words. This task, as well as all other tasks, were scored by the same experienced neuropsychologist trained in the administration and scoring of language related tasks. A non-word was considered correct only if every phoneme was pronounced correctly.

Note that previous validation and correlation studies have shown that the item delayed repetition task presents a specific association with other phonological processing tasks and that both the item delayed and immediate serial recall tasks show a strong dependency on access to item level linguistic information, in contrast to the serial order STM measures reported below (Hulme et al., 1991; Majerus et al., 2006a, 2008; Martinez Perez et

al., 2012). Word and nonword versions of these tasks are also highly correlated (e.g., Majerus et al., 2006a).

### ***STM for order information***

STM for serial order information was assessed for both verbal and nonverbal materials, using two serial order reconstruction tasks. The first task was an adaptation of the serial order reconstruction task used by Majerus et al. (2015). It consisted of the auditory presentation of digit lists of increasing length. Each list contained 4 to 7 digits, sampled from digits 1 to 7. For a list of length  $N$ , only the first  $N$  digits were used (e.g., for a list of length 4, the digits 1, 2, 3 and 4 were presented in each trial). For a given sequence length, only the order of the digits varied between trials. After a list was presented, children were requested to reconstruct the order of presentation of the digits, by using cards on which the digits were printed, and by arranging them horizontally on the desk. The number of cards given to the participants corresponded exactly to the number of digits used in the lists for each sequence length. In total, 24 lists were presented ranging from 4 to 7 items in length, with six lists per sequence length. The test-retest reliability was moderate-to-strong with  $R=.68$  (Leclercq & Majerus, 2010).

To assess STM for serial order information independently of verbal abilities, we also used a STM for order information task in a nonverbal modality. This task was an adaptation of the nonverbal serial order reconstruction task used by Hachmann et al. (2014), administered using Open Sesame (Mathôt et al., 2012). It consisted of the visual presentation of nonsense drawings in lists of increasing length. Each list contained 4 to 7 drawings. For each list length, the same drawings were presented and only their order varied. For each trial in a given sequence length, the same drawings were presented and only their order varied. For a list of length  $N+1$ , the same drawings as for list length  $N$  were used plus one new drawing. As in the verbal serial order task, children responded by horizontally arranging cards representing the drawings on the desk. The procedure of the two tasks, with the same predictable stimuli used in each trial, ensured that processing and maintenance of item information were minimized while the task requirements maximized serial order processing, retention and recall. For both serial order reconstruction tasks, the dependent measure was the proportion of items placed

in the correct serial position across all trials, with an internal consistency reliability coefficient of  $\alpha = .88$  for the nonverbal serial order reconstruction task.

Finally, we computed a serial order recall measure for the word/pseudoword immediate serial recall task described in the previous section by calculating the proportion of items recalled in correct serial position relative to the overall amount of items that were recalled, allowing us to obtain a serial order recall measure corrected for differences in item recall abilities. Serial order recall measure for nonwords showed a reliability coefficient of  $\alpha = .79$  and serial order recall measure for words showed a reliability coefficient of  $\alpha = .77$ . Note that previous validation studies have shown that the serial order reconstruction task used here shows a specific correlation with order but not item errors in word and nonword recall tasks (Majerus et al., 2006b; Majerus & Boukebza, 2013).

### ***General Procedure***

The children were assessed individually in a quiet room in their school or at home. The tasks were administered in a fixed order. The tasks were presented in two separate sessions each lasting approximately 1h30 and included measures that are not developed in this study.

### ***Data analysis***

We conducted four sets of analyses. The first set of analyses tested whether the group of dyslexic children differed from the group of control children, for all measures collected in the study. This was done separately for each task, using generalized linear mixed model analyses on item-level data to account for variability between items. To account for both item-level and participant-level variation, random intercepts for both items and participants were included in the model. The analyses assumed a normal distribution for tasks scored as a proportion correct per trial (the two ISR tasks and the two serial order reconstruction tasks) and a binomial distribution for tasks scored 0-1 (the two phonological processing tasks and the item delayed repetition task). To control for differences of cognitive ability and vocabulary between the two groups, scores on Raven's matrices and the EVIP were included as covariates in the analyses.

These analyses were conducted using package lme4 (Bates et al., 2015) for R (R Core Team, 2022). Tested (general) linear mixed models were of the form "item score ~ 1 + (1|participant) + (1|item) + Raven + EVIP + group". Statistical tests were performed by comparing a model with group as a predictor, to a restricted model without group as a predictor, using a chi-squared test. This analysis involved nine different tests; to control for inflation of type I error due to multiple comparisons, p-values were also corrected using Benjamini-Hochberg correction for false discovery rate (FDR; Benjamini & Hochberg, 1995).

The second set of analyses compared the extent of the difference between the two groups of children for pairs of critical tasks based on the variables manipulated in this study (phonological abilities versus short-term memory; short-term memory for item information vs. short-term memory for serial order information; See also below for further justification of the pairs of tasks to be contrasted). These analyses could not be performed at the item level and were instead done at the level of total task scores. We used mixed-design analyses of covariance (ANCOVAs), with group as a between-subjects variable (dyslexic vs. control), and task as a within-subjects variable (e.g. phoneme deletion task vs. minimal pair discrimination task), again including scores on Raven's matrices and the EVIP as covariates. The test of interest was the interaction between group and type of task.

The third set of analyses tested the specificity of the group effects observed in the previous analyses, by determining whether the group effects for a given task remained significant after controlling for another critical task (i.e., do serial order short-term memory deficits remain significant after controlling for item short-term memory deficits; see below for further justification). These analyses were conducted using the same design outlined for the previous set of analyses, but with additional covariates. These covariates are detailed separately for each analysis in the Results section.

Lastly, the fourth set of analyses used the approach of a multiple case study and examined individual levels of deficit for each task in each dyslexic child. We used age-corrected z-scores for determining individual deficit levels rather than an inferential statistical approach such as Crawford and Howell's modified t-tests, which require comparing the score of a given participant to the average of the control group (Crawford & Howell, 1998). The latter

procedure, although specifically designed for single case studies, would have been problematic here given the age range of the dyslexic and control groups. Proper use of this procedure would have required dividing the control group into multiple subsamples with a narrow age range and of small size, introducing discontinuity errors (e.g. child aged 9 years 11 months would have been compared to a different subsample and a different performance level than a child aged 10 years of age while the actual difference in age between the two is minimal) (Lenhard et al., 2019).

Instead, we used regression-based norming approach (Zachary & Gorsuch, 1985). This method has the advantage that it can be used with a smaller sample size than a traditional norming approach (Oosterhuis et al., 2016). The following steps were applied (see van Van Breukelen & Vlaeyen, 2005). Performance in a given task was regressed on age in the whole control group ( $n = 30$ ); the parameters of this regression were used to predict the expected score of each dyslexic child given their age; the discrepancy between actual and expected scores was retrieved and divided by the standardized residuals of the regression for the control group. For each dyslexic child, this procedure yielded a z-score reflecting their standardized distance to the expected score based on chronological age and associated performance in the control group. Since the distributions of all variables were normal or close to normal, z-scores below -1.65 only occur with a 5% probability (one-tailed distribution) and these z-scores can be considered as abnormally low and corresponding to a deficit (Aguert & Capel, 2018).

### 3. Results

#### Group-level analyses: Overall differences between groups

**Table 2** presents descriptive statistics for the total performance of dyslexic and control children in the various phonological processing and STM tasks. The distribution of all variables was normal or close to normal (the largest skewness coefficient was -1.66, reflecting high overall performance for controls in the phoneme deletion task).



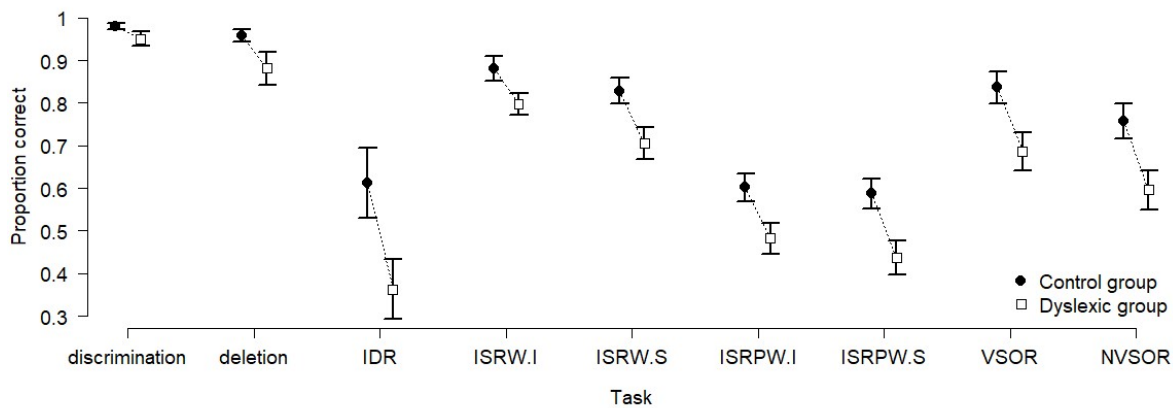
**Table 2***Descriptive statistics and group differences between control and dyslexic children*

Measure	Descriptive statistics		Test of the group effect, controlling for cognitive ability and vocabulary		
	Controls	Dyslexics	$\chi^2(1)$	<i>p</i> - value	FDR correction
	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )			
Minimal pair discrimination	.98 (.14)	.95 (.22)	7.21	.007	**
Phoneme deletion	.96 (.20)	.88 (.32)	11.63	<.001	***
Item delayed repetition	.61 (.49)	.36 (.48)	13.09	<.001	***
ISR words – item	.88 (.21)	.80 (.26)	12.50	<.001	***
ISR words – serial order	.83 (.27)	.71 (.35)	17.49	<.001	***
ISR pseudowords – item	.60 (.33)	.48 (.34)	15.70	<.001	***
ISR pseudowords – serial order	.59 (.34)	.44 (.38)	20.29	<.001	***
Verbal serial order reconstruction	.84 (.24)	.69 (.31)	17.22	<.001	***
Non-verbal serial order reconstruction	.76 (.28)	.60 (.32)	18.01	<.001	***

*Note.* All tasks were scored as average proportion correct for this table. ISR = Immediate Serial Recall, *M* = Mean, *SD* = Standard Deviation, *FDR* = level of significance after applying the correction for False Discovery Rate. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$ .

The results of group comparisons (controlling for cognitive ability and vocabulary, and accounting for participant- and item-level variation) are detailed in **Table 2**. There were significant differences between control and dyslexic participants in all tasks, and all differences remained significant when applying correction for multiple comparisons. In all cases, the dyslexic group performed worse than the control group on average. The results are summarized in **Figure 1**.

**Figure 1.** Average performance in the two groups for all tasks.



*Note.* Error bars represent 95% confidence intervals of the mean. IDR = Item delayed recall; ISRW.I = Item serial recall for words, item score; ISRW.S = Item serial recall for words, serial order score; ISRPW.I = Item serial recall for pseudowords, item score; ISRPW.S = Item serial recall for pseudowords, serial order score; VSOR = verbal serial order reconstruction; NVSOR = non-verbal serial order reconstruction.

### Group-level analyses: Group differences controlling for other abilities

The next set of analyses compared the extent of deficits in the dyslexic group across pairs of comparable tasks contrasting the critical variables manipulated in this study (phonological abilities versus short-term; short-term memory for item information versus short-term memory for order information). The results of these comparisons are summarized in **Table 3**.

Firstly, we investigated whether the phonological deficit of dyslexic children was more pronounced, when a high short-term memory load was involved as in the phoneme deletion task » (Minimal pair discrimination vs. phoneme deletion). There was a significant two-way interaction between group and task for the two phonological processing tasks, indicating that the dyslexic group was comparatively more impaired on the deletion task than on the minimal pair discrimination task. Secondly, we explored whether dyslexic children had greater impairment in recalling items in correct order vs. recalling items independently of serial order requirements (ISR words – item score vs. serial order score and ISR pseudowords – item score

vs. serial order score). The interaction was also significant for the comparison between item scores and serial orders scores on the ISR task for both words and pseudowords, indicating that the dyslexic group was comparatively more impaired for serial order scores (i.e. when taking into account both item recall and serial order recall). We then examined whether the serial order STM deficit was greater than the item STM deficit (Item delayed repetition vs. verbal serial order reconstruction). Finally, we investigated whether the serial order STM deficit was specific to the verbal modality or whether it generalized to the visual modality (Verbal vs. non-verbal serial order reconstruction). There was no interaction for the comparison between item delayed repetition and verbal serial order reconstruction, or for the comparison between the verbal and non-verbal serial order reconstruction tasks.

**Table 3**

*Descriptive statistics and group differences between control and dyslexic children*

Comparison	Test of the group*task interaction			
	<i>F</i> (1, 51)	<i>p</i> -value	FDR correction	$\eta^2_p$
Minimal pair discrimination vs. phoneme deletion	6.71	.012	*	.12
ISR words – item score vs. serial order score	6.12	.017	*	.11
ISR pseudowords – item score vs. serial order score	10.95	.006	*	.18
Item delayed repetition vs. verbal serial order reconstruction	2.57	.115		.05
Verbal vs. non-verbal serial order reconstruction	0.20	.653		.00

*Note.* ISR = Immediate Serial Recall, *FDR* = level of significance after applying the correction for False Discovery Rate. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$ .

Next, we assessed the specificity of the deficits of dyslexic children observed in the initial group analyses. First, we tested whether the deficit in STM for serial order was

independent of the deficit in STM for items. This was examined based on the item delayed repetition task and the two serial order reconstruction tasks, which maximally oppose item and serial order requirements (rather than the ISR tasks, where participants are required to remember both the items and their serial order). To determine if the deficit in verbal item recall could be explained by the deficit in serial order recall, the effect of group on item delayed repetition task was tested controlling for verbal serial order reconstruction. Second, to test if the deficit in verbal serial order recall could be explained by the deficit in verbal item recall, the effect of group on verbal serial order reconstruction was tested controlling for item delayed repetition task. Next, we examined whether the poor performance of the dyslexic group for the verbal and visual reconstruction tasks reflected a common deficit, after accounting for modality effects. The effect of group on verbal serial order reconstruction was tested controlling for performance in the visual serial order reconstruction task and the item delayed repetition task (the latter for accounting for the verbal aspect of the verbal serial order reconstruction task). The results of these analyses are summarized in **Table 4**.

**Table 4**

*Group effect analysis for the verbal item and serial order STM measures*

Dependent variable	Covariates	Test of the effect of group	
		$\chi^2(1)$	<i>p</i> -value
Item delayed repetition	Verbal serial order reconstruction	6.55	.010
Item delayed repetition	Non-verbal serial order reconstruction	7.77	.005
Item delayed repetition	Verbal serial order reconstruction	5.48	.019
	Non-verbal serial order reconstruction		
Verbal serial order reconstruction	Item delayed repetition	9.86	.002
Verbal serial order reconstruction	Non-verbal serial order reconstruction	5.28	.022
Verbal serial order reconstruction	Item delayed repetition	2.46	.116
	Non-verbal serial order reconstruction		

Overall, the deficit in verbal item recall appeared to be independent from the deficit in serial order recall: the difference between the two groups in the item delayed repetition task remained significant when controlling for verbal serial order reconstruction. Moreover, the deficit in verbal serial recall remained significant when controlling for the item delayed repetition task, but it became non-significant when further adding the visual serial order reconstruction task, suggesting the dependency of the group effect for the visual and verbal serial order reconstruction tasks.

**Table 5**

*Group effect analysis for the phonological processing and verbal item STM measures*

Dependent variable	Covariates	Test of the effect of group	
		$\chi^2(1)$	<i>p</i> -value
Minimal pair discrimination	Item delayed repetition	0.39	.535
	ISR pseudowords – item score		
Phoneme deletion	Item delayed repetition	0.40	.525
	ISR pseudowords – item score		
Item delayed repetition	Minimal pair discrimination	4.19	.041
	Phoneme deletion		
ISR pseudowords – item score	Minimal pair discrimination	4.06	.044
	Phoneme deletion		

A second aspect of this question was to determine whether the deficits in phonological processing and verbal item STM could be explained by each other (such that dyslexic children perform lower in phonological processing because they have difficulties maintaining to-be-processed phonemes in short-term memory, or such that dyslexic children perform lower in verbal item STM because they have difficulties processing to-be-remembered phonemes). This was tested by considering the two phonological processing tasks, and the two item STM tasks with the highest phonological requirements: item delayed repetition and the item recall score for pseudowords ISR. The effect of group on each of the phonological processing tasks was tested controlling for the two item memory tasks, and the effect of group on each of the item memory tasks was tested controlling for the two phonological processing tasks. The

results are summarized in **Table 5**. Overall, the effect of group on each of the two phonological processing tasks became non-significant when controlling for performance in verbal item recall, suggesting that poor performance in the phonological tasks could be the consequence of a deficit in verbal STM in dyslexic children. By contrast, the effect of group on the two item STM tasks remained significant when controlling for phonological processing, indicating that difficulties with phonological processing did not account for the deficit in STM for verbal items.

### Single-subject analyses

Next we assessed the potential heterogeneity of STM deficits in our group of dyslexic children, by determining, via an individual-level analysis, the distribution of item and serial order STM deficits across our sample. For each child with dyslexia, we computed composite z-scores as described in the Data Analysis section, one for item STM (by averaging the age-corrected z-scores for the item delayed repetition task as well as the word and nonword ISR item recall scores) and one for STM for serial order (by averaging the age-corrected z-scores for the verbal serial order reconstruction and the visual serial order reconstruction tasks). For phonological processing, a composite z-score was determined separately for phonetic perception (minimal pair discrimination task) and phoneme manipulation (on the phoneme deletion task). The phonetic perception composite z-score was computed by averaging the age-corrected z-scores for the standard speech rate score and the accelerated speech rate scores in the minimal pair discrimination task. The phoneme manipulation composite z-score was the average of age-corrected z-scores for the bi-syllabic score, the monosyllabic C-V-C score and the monosyllabic C-C-V score in the phoneme deletion task.

For the STM abilities, composite z-score analysis showed that a total of thirteen dyslexic children (52% of the sample) were impaired on at least one STM composite z-score as shown in **Table 6**. Furthermore, a more detailed analysis reveals three different profiles in the dyslexic group. As shown in **Figure 2**, four children showed selective item STM impairment E, K, P, R (see Table 2). Six children showed selective serial order STM impairment, C, L, M, V, X, Y. Further three dyslexic children (Q, U, W) showed impairment for both serial order and item STM components. Notably, twelve children showed no impairment as defined by our threshold (composite z-score < -1.65) but their z-scores remained nevertheless negative, indicating overall lower performance as compared to the control group.

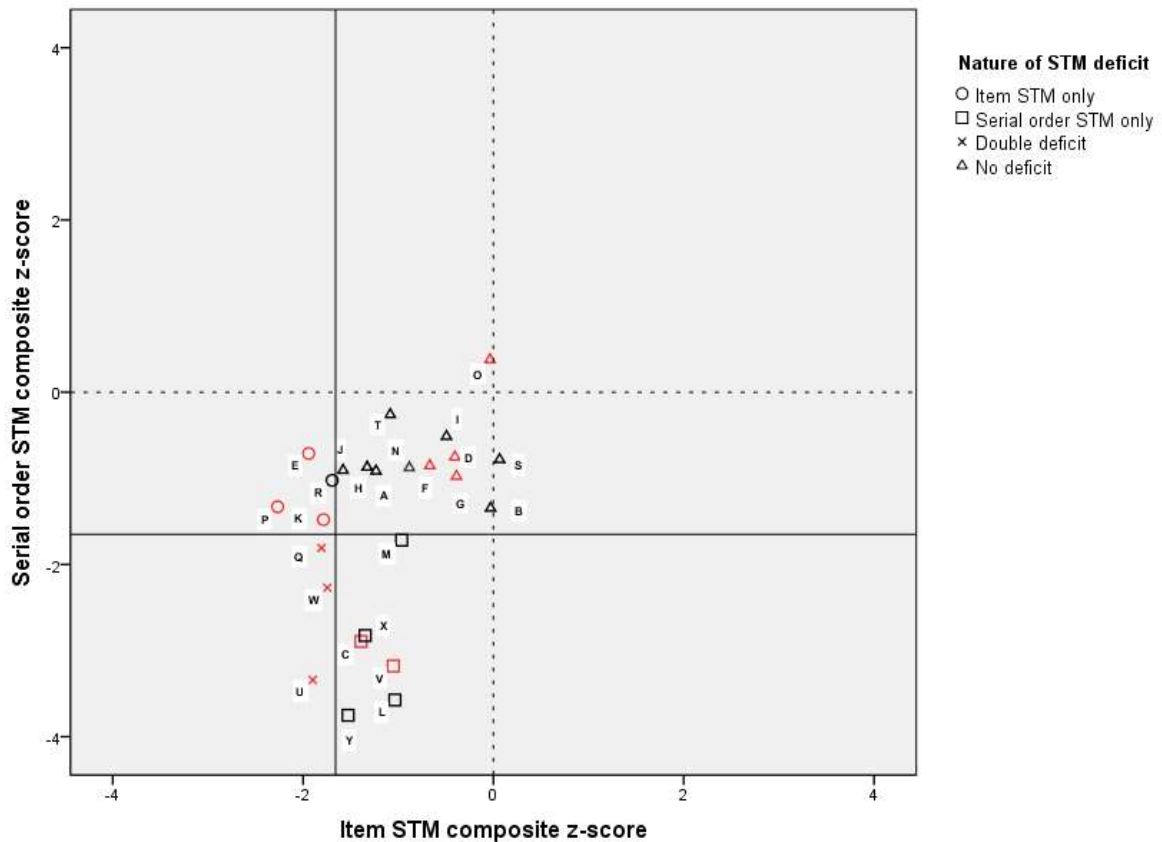
Table 6

*Composite z-scores for STM and phonological variables*

Dyslexic Child	item STM	serial order	Phonetic	Phonological
	composite z-score	STM composite z-score	perception composite z-score	awareness composite z-score
A	-1.23	-0.91	-1.64	-0.71
B	-0.03	-1.35	0.75	0.85
C	-1.39	-2.89*	-1.68*	-1.42
D	-0.41	-0.75	0.71	-2.45*
E	-1.94*	-0.71	-2.13*	-8.52*
F	-0.67	-0.85	-1.67*	-0.43
G	-0.39	-0.98	0.20	-2.86*
H	-1.33	-0.87	0.69	0.07
I	-0.49	-0.51	-0.30	0.07
J	-1.58	-0.91	0.20	-0.98
K	-1.79*	-1.48	-0.30	-3.08*
L	-1.04	-3.57*	-0.24	0.27
M	-0.96	-1.72*	-0.81	0.25
N	-0.88	-0.88	0.17	0.49
O	-0.04	0.38	-5.06*	-1.09
P	-2.27*	-1.33	0.16	-1.67*
Q	-1.81*	-1.81*	-1.81*	-3.50*
R	-1.70*	-1.02	-0.34	-1.19
S	0.07	-0.78	0.14	-0.71
T	-1.08	-0.26	0.62	0.07
U	-1.90*	-3.34*	-4.04*	-8.07*
V	-1.05	-3.18*	-2.70*	-1.82*
W	-1.75*	-2.27*	-5.10*	-2.86*
X	-1.35	-2.83*	0.62	0.31
Y	-1.53	-3.75*	-0.30	-0.75

\* z-score indicating significant impairment

Figure 2. Distribution of dyslexic children according to their STM deficits



Notes. Lines correspond to  $z = -1.65$  threshold. The red shapes represent dyslexic children with a deficit in at least one component of phonological abilities.

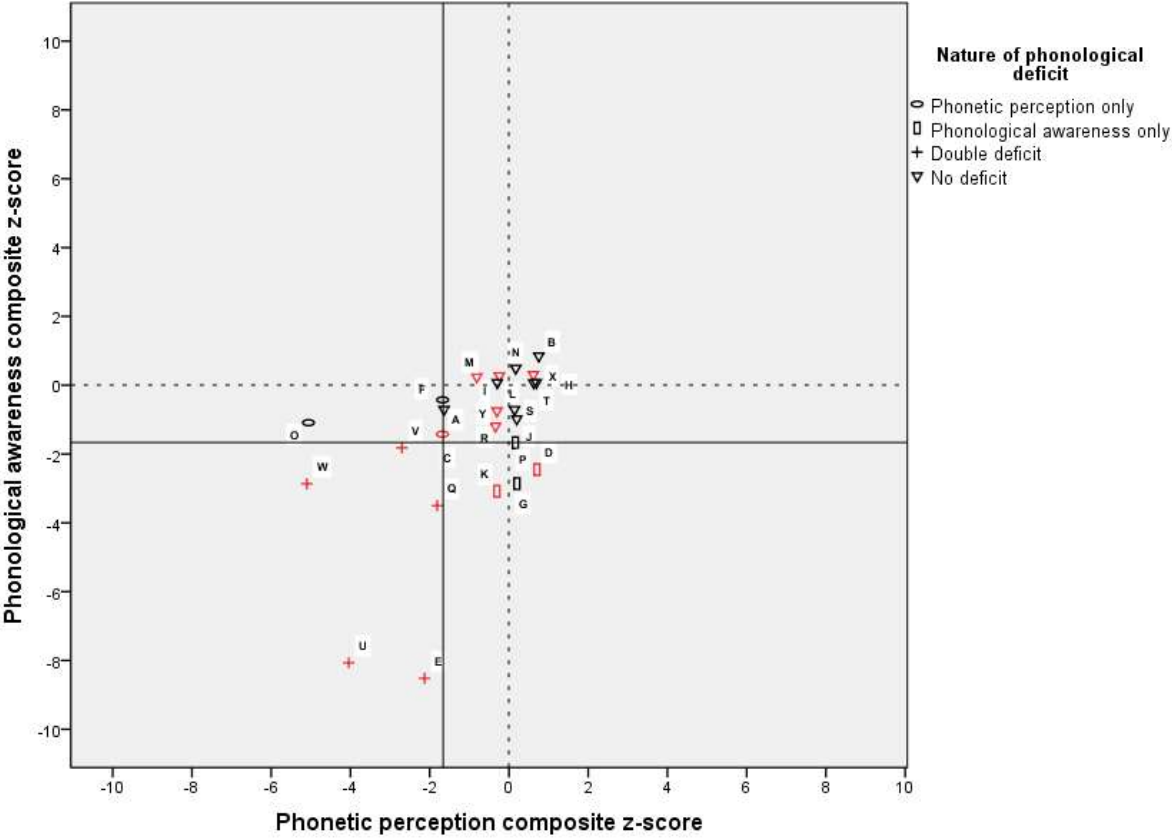
For phonological processing, z-score analysis showed that a total of twelve dyslexic children (48% of the sample) were impaired on at least one z-score. As shown in **Figure 3**, phonetic discrimination was selectively impaired in three dyslexic children (C, F, O). Phonological awareness was impaired without phonetic discrimination in four children (D, G, K, P). Five dyslexic children showed impairment for both phonetic discrimination and phonological awareness (E, Q, U, V, W).

Finally, we compared composite z-scores between STM and phonological processing domains. On the one hand, the three children (U, Q, W) who had a combined item-serial order deficit in STM also had a double deficit in phonological processing. Of the six children with a serial STM deficit, only one child had a phonetic perception deficit (C) and another had a phonological impairment on both measures (V). Of the four children with an isolated deficit in verbal item STM, three of them had phonological deficits (E, K, P) with respectively a double



deficit (E) and a phonological awareness disorder (K, P). Overall, children presenting an item STM deficit (isolated or in combination with a serial order STM deficit) also presented a phonological deficit, except for one child (R). Similarly, of the nine dyslexic children with a phonetic perception impairment, only two (F, O) presented a discrimination deficit without a deficit in STM. Similarly, of the nine dyslexic children with a phonological awareness deficit, phonological awareness was the only deficit in only two dyslexic children (D, G).

Figure 3. Distribution of dyslexic children according to their phonological deficits



Notes. Lines correspond to  $z = -1.65$  threshold. The red shapes represent dyslexic children with a deficit in at least one STM component.

**4. Discussion**

This study aimed to re-examine item and serial order STM as well as phonological processing abilities in children with dyslexia and to determine the potential heterogeneity of

STM deficits in this population. At the group level, deficits in phonological processing as well as in both serial order and item STM were found, in line with previous studies. At the individual level, important heterogeneity of STM deficits was observed with a dissociation between item and serial order STM impairments. Indeed, 24% of children had a selective deficit in serial order STM, and 16% had a selective deficit in item STM, while 12% were impaired on both serial order and item STM. The other children showed STM z-scores that were all below zero except for two children. Our results overall highlight two subgroups of dyslexic children, one subgroup with combined phonological and item STM deficits and another subgroup with more selective serial order STM deficits.

### **The nature of short-term memory deficits in dyslexia**

Our group analyses showed poorer STM performance in the dyslexic group relative to the control group, and this for both item STM and serial order STM. The analyses of covariance showed that the deficit in serial order STM remained significant after control of group differences in item STM. Furthermore, our children with dyslexia presented a serial order STM deficit in both the verbal and the visual modality. These results are in line with previous studies having explored item and serial order STM abilities in dyslexia (Cowan et al., 2017; Hachmann et al., 2014, 2020; Martinez Perez et al., 2013, 2015; Romani et al., 2015).

Giorgetti and Lorusso (2019) suggested that the serial order STM deficits in dyslexia may be the result of less efficient verbal recoding. Our results are not consistent with this hypothesis, since dyslexic children also performed worse than the control group in the nonverbal serial order reconstruction task including visual presentation of difficult to verbalize nonsense drawings. A potential limitation of our study is that there was an additional oral-to-written mapping process during response production in the serial order reconstruction task. However, the presentation of written cues was intended to facilitate item processing, as it will give full access to the items that had been presented and only their serial order needs to be reconstructed. Furthermore, recognition of written digits is a highly overlearned process even in dyslexic children although we cannot rule out that dyslexic children may be slower in naming digits (e.g., Nicolson & Fawcett, 1994). In order to neutralize any bias that may result at this level, we used several, structurally different tasks to obtain composite serial order vs

item STM abilities. Note also that the other serial order STM tasks did not include oral-to-written mapping processes and that we observed the same results even for purely visual task conditions (the visual serial order recognition tasks). Hence, although we acknowledge that the oral-to-written mapping of the verbal serial order reconstruction could have led to some slowing of results, we believe that the overall study design allows to minimize the biases that could have resulted from this situation. However, the poor performance of the dyslexic group for the verbal and visual reconstruction tasks appeared to reflect a common deficit, as suggested by analysis of covariance.

Our individual-level analyses also revealed important new findings. First, 52% of the children with dyslexia showed a ‘true’ deficit on at least one of the two STM components (relative to the deficit-threshold of performance 1.65 standard deviations below control performance), while the remaining children showed STM z-scores that were all below zero except for two children. Secondly, we observed a heterogeneity of STM impairment in dyslexic children, with a dissociation between serial order and item STM deficits. Indeed, 24% of children had a selective impairment of serial order STM, and 16% had a selective impairment of item STM. 12% of children were impaired on both serial order and item STM. Third, we observed that the serial order STM deficit could be detected in dyslexic children without being systematically associated with an impairment of phonetic discrimination or phonological awareness. Indeed, of the six children with a serial order STM deficit, only one child had a phonetic discrimination deficit and another had a phonological impairment on both measures.

These individual profile analyses complete the results of the group analyses and support the idea that the item and serial order STM deficits are independent. These dissociations are consistent with longitudinal studies which have shown that serial order STM abilities predict reading acquisition independently of item STM abilities (Binamé & Poncelet, 2016; Hachmann et al., 2020; Martinez Perez, Majerus, & Poncelet, 2012; Ordonez Magro et al., 2020; Schraeyen et al., 2017). More generally, several studies have shown that dyslexic individuals may have deficits in sequential information processing also in tasks outside the STM domain (Hedenius et al., 2013; Peter et al., 2018; Peter, Albert, & Gray, 2021; Ram-Tsur et al., 2006, 2008). Importantly, the present study suggests that if this is the case, it does not concern all children with dyslexia to the same extent. However, an alternative hypothesis is

to consider that these dissociations between serial order STM deficits and phonological processing impairments are only a consequence of a difference in material and procedure. Indeed, part of the item measures we used were very similar to the phonological processing tasks because they used pseudowords. Hence it could be argued that the closer association between item STM tasks and phonological processing tasks, relative to serial order STM tasks is due to stimulus material similarity rather than item STM per se. Critically, whether running the analyses on the item vs. serial order scores for the immediate serial recall tasks sharing the same material or on the item delayed repetition versus serial order reconstruction tasks that use different material, the same pattern of results was observed. Furthermore, while using the same material, the item STM task predicted phonological processing abilities but the reverse was not true.

### **Are verbal item STM deficits independent of phonological impairment?**

Our group analyses showed poorer phonological processing performance in the dyslexic group relative to the control group for both phonetic discrimination and phonological awareness tasks, and the group effect was more pronounced for the phonological awareness measures. These results are consistent with previous studies showing a deficit in phonological processing (Ramus, Marshall, Rosen, & Van Der Lely, 2013; Soroli et al., 2010).

Our analysis of individual profiles revealed that 48% of the children with dyslexia showed a deficit on at least one of the two phonological processing tasks. As in the case of STM abilities, we observed a large heterogeneity in phonological processing abilities, with 12% of dyslexic children presenting an impairment of phonetic discrimination without phonological awareness deficit, 16% presenting an impairment of phonological awareness without phonetic discrimination deficit, and 20% showing an impairment for both phonemic discrimination and phonological awareness. In addition, we observed a frequent association between phonetic discrimination impairment and impairment of either item STM or phonological awareness. Indeed, of the eight dyslexic children with an impairment of phonetic perception, only two had a z-score above the deficit threshold in verbal item STM or phonological awareness.

Furthermore, when we controlled for group differences in either the phonological awareness task or the phonetic discrimination task, the group differences in the verbal STM tasks remained significant. At the same time, the group differences in the phonemic deletion task and phonetic discrimination task disappeared after control of group differences in the verbal STM tasks. This suggests that in children with dyslexia, verbal item STM deficits are not only the consequence of phonological awareness or phonetic discrimination impairments. But poor performance in the phonological processing tasks may be accounted for by item STM impairment. Our results contrast with the hypothesis that phonological awareness deficits would be the only origin of low performance in verbal STM tasks (Jarrold et al., 2009; Messbauer & de Jong, 2003; Snowling et al., 1991; Windfuhr & Snowling, 2001). However, it is also possible that our item STM tasks were more sensitive than the two phonological tasks, as is suggested by the larger inter-individual variability for the STM scores as compared to the phonological scores. Soroli et al. (2010) showed that dyslexic adults had difficulties in phonological processing particularly when the working memory load of the task was high. Overall, when considering together the results of the group-level and individual-level analyses, the safest conclusion is that item STM and phonological processing impairment are associated rather than dissociated. In addition, it is likely that phonological awareness tasks involve STM loading at the sequential level, particularly in young children whose phonological segmentation skills are less developed/automated. Our multiple case studies and our additional analyses in the appendix (Table A.1) suggest that the deficit of dyslexic children in the phonological awareness task is not merely associated with low automated phonological segmentation skills and the sequential aspects of this task.

### **Are there several possible pathways leading to dyslexia?**

The present study appears to highlight at least two distinct profiles of STM deficits in dyslexia, one profile involving children with combined phonological and item STM deficits and another profile with more specific serial order STM deficits. This finding is in line with other recent and less recent studies that have suggested the existence of several pathways that may lead to dyslexia. Pennington et al. (2012) tested five different pathways to dyslexia including two single-deficit models (single phonological deficit; single deficit subtypes), two multiple-deficit models (phonological core with multiple deficits; multiple deficits) and one hybrid

model that encompassed all four previous possibilities. The cognitive abilities measured in that study were phonological awareness, language skills and processing speed and/or naming speed in two large samples of children. The authors found that although 40% of the dyslexic cases of these samples did not show deficits consistent with the different models, the hybrid model provided the best global fit to the data. This indicates that there are several possible pathways for developing dyslexia, some involving single deficits and others involving multiple deficits. In addition, although the phonological deficit hypothesis remains among the most influential in dyslexia research, phonological problems may need to interact with other cognitive risk factors to eventually lead to reading disability ((Peterson & Pennington, 2012).

A further question that arises is whether the phonological-item STM and serial order STM pathways could lead to different reading profiles in dyslexia. Nithart and al. (2011) observed that serial order STM was predictive of the development of early reading decoding abilities, while phonological STM predicted word recognition performance. For these authors, the practice of grapheme-phoneme conversion rules would be related to serial STM capabilities involved in maintaining the order of phoneme sequences during decoding, while phonological STM would be involved in associating an assembled sequence of phonemes to long-term phonological representations of words during written word recognition. Martinez Perez et al. (2012) conducted a longitudinal study with children from kindergarten to first grade, and observed that order STM ability but not item STM ability, predicted independent variance in reading decoding performance one year later. They also argued for a specific role of order STM in the acquisition of decoding. Hachmann et al. (2020) provided further data highlighting serial order STM as an important factor in the early development of reading abilities, particularly during decoding and grapheme-phoneme conversion. In the light of these findings, we suggest that dyslexic children with an item STM deficit may present increased difficulties in phonological coding, defined by Leinenger (2014) as the recoding of written, orthographic information into a sound based code. In contrast, dyslexic children with a serial order STM deficit may be most impaired for sequential decoding in reading, when the successive products of letter-sound conversion processes must be stored in a sequential manner before reading output (Martinez Perez, Majerus, & Poncelet, 2012).

This hypothesis is also supported by data from spelling acquisition. Binamé and Poncelet (2016) observed that serial order STM ability was a solid independent predictor of nonword reading and spelling performance at first and second grades, but was not related to frequent and irregular word reading and spelling abilities. These findings support the hypothesis that serial order STM does not directly contribute to reading and spelling when orthographic representations in long-term memory can be used for reading or spelling the words. Ordonez Magro et al. (2020, 2021) showed that serial order STM abilities remained however predictive of reading and spelling abilities of both regular and irregular words for children in the second grade of elementary school, likely because the non-lexical reading procedure is still used as orthographic representations are not yet fully represented in long-term memory. It is therefore likely that the involvement of serial order STM in reading performance is modulated by the quality and quantity of orthographic representations stored in long-term memory. In sum, the developmental trajectory of dyslexic children may differ, depending in part on the nature of their STM deficit. Dyslexic children with an item STM deficit may present difficulties in both the lexical and non-lexical reading procedures, in association with phonological impairment, and may thus benefit from early interventions based on training phonological skills. On the other hand, dyslexic children with a serial order STM deficit may benefit more from interventions based on the installation of long-term orthographic representation in order to increase reliance on the lexical reading procedure, thereby compensating for their sequential processing and decoding difficulties.

## **Conclusion**

This study examined phonological processing, item STM and serial order STM abilities in children with dyslexia, and confirmed dissociations between item STM/phonological deficits vs. serial order STM deficits, at both group-level and individual-level analyses. Our results highlight the interest for practitioners to consider reading as a learning process involving both language and non-language cognitive abilities, which can be impaired in distinct ways. This study also stresses the importance of conducting comprehensive STM assessments for individuals with reading disabilities in order to allow for the implementation of the most adapted remediation procedure.





# ETUDE 2: The independence of attentional control and working memory deficits in children with dyslexia

Auteurs : Sarah Wokuri, Nathalie Marec-Breton & Steve Majerus

Ce texte est la reproduction d'un article qui sera soumis pour publication

## 1. Introduction

Developmental dyslexia is characterized by persistent learning difficulties in reading, despite adequate instruction, intelligence, and sensory abilities (Peterson & Pennington, 2015). Children with dyslexia are impaired in their abilities to develop the procedures for recognizing and spelling words accurately or fluently. However, they also often present with associated deficits at the level of verbal working memory (WM) (Gathercole et al., 2016; Jeffries & Everatt, 2004; Menghini et al., 2011; Tiffin-Richards et al., 2008). These difficulties have been linked to underlying phonological processing difficulties affecting processing of individual items but also to difficulties of processing the serial order of items within a memory sequence (e.g., Hachmann et al., 2020; Martinez Perez et al., 2012; Szmalec et al., 2011). A third variable that may explain verbal WM deficits in dyslexia are difficulties at the level of attentional control (S. Wang & Gathercole, 2013). The aim of this study is to examine the nature and role of attentional processing difficulties in WM and phonological impairments in children with dyslexia, by further distinguishing between item and serial order aspects of WM.

### Working Memory and attention

Most theories of WM consider that attention is an essential component of WM, even for simple WM tasks such as word span or digit span tasks. For example, the embedded-processes model of WM (Cowan, 1999) considers that WM results from the part of long-term memory that is currently activated and hold in the focus of attention. The focus of attention defines our scope of attention and is considered to be limited to 4 units or less (items or chunks of items), thereby also explaining the limits of WM capacity (Cowan, 2000; Oberauer, 2008). Similarly, Engle and Kane (2003) have proposed a theoretical account considering that

attentional control is needed to protect memoranda from interfering stimuli and to maintain the goal of the ongoing task. Although it is not directly integrated into a WM model, the concept of visual-attention (VA) span (Bosse et al., 2007), studied more specifically in the context of dyslexia (see below), is a notion that can be compared to the focus of attention concept proposed by Cowan (2005). It has been defined as the quantity of distinct visual elements that can be processed simultaneously in a multi-element array, regardless of the verbal or non-verbal nature of those elements (Lobier et al., 2012). This concept of the attention span seem may also be extended to auditory information (Lallier et al., 2013a).

Other theories consider that attentional control intervenes more directly in complex span tasks, when memoranda need to be further processed (Baddeley, 1986; Baddeley et al., 2021). Barrouillet and colleagues have operationalized the role of attention in WM by considering that WM performance is determined by the ratio of time required by an attentional control demanding task relative to the time available for (attentional) processing of the memoranda (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004). In the paradigm they developed, the time available for performing a secondary task (e.g., number parity judgment) is manipulated while participants have to encoding and maintain a list of verbal items (e.g., digits) memoranda. By determining WM performance decrement for high versus low demanding secondary tasks (i.e., with high or low time pressure), they estimate the impact of attentional processing on WM. By using the same paradigm, Vergauwe et al. (2014) further investigated the interaction between WM load and attentional control by varying the number of items to be maintained in memory. They observed that processing of the secondary tasks starts to get disrupted for a WM load of three items or more, suggesting that higher verbal WM load also represents higher attentional control demands.

### **Working memory and attention in dyslexia**

Next, we review the literature on WM impairment in dyslexia and its possible association with attentional impairment. One series of studies has focused on the visual attentional (VA) span tasks mentioned above. These studies generally showed impaired performance for these tasks in dyslexic children and adults (Bosse et al., 2007; Germano et al., 2014; Lobier et al., 2012; Saksida et al., 2016; Zoubrinetzky et al., 2014), for either whole report measures (all briefly presented letters need to be reported) or partial report measures

(a cued letter among the briefly presented letter string needs to be reported). These results suggest difficulties in focus or scope of attention capacity in dyslexia, according to Cowan's theoretical framework (1995). However, part of these results, particularly those for whole report task conditions, may be somewhat difficult to interpret due to a confound between attentional and storage aspects of the VA span tasks.

Another line of research investigated attentional control in WM by examining the ability of dyslexic participants to simultaneously maintain and process information in complex span tasks. For example, a number of studies showed a deficit in the backward digit span tasks, in both children and adults with dyslexia (Jeffries & Everatt, 2004; Reiter et al., 2005; Sela et al., 2012; Tiffin-Richards et al., 2008). However, other studies using the same task or another storage and processing WM task such as a complex counting span task did not show specifically impaired performance in participants with dyslexia, and this particularly when controlling for impairment in simple span tasks (Demont & Botzung, 2003; Kibby et al., 2004; Maehler & Schuchardt, 2016; Moura et al., 2015; Schuchardt et al., 2008). Other studies showed more specific impairment in N-back tasks (Alt et al., 2022; Beneventi et al., 2010; Sela et al., 2012) but this deficit may have stemmed from difficulties in resisting proactive interference rather than limitations in attentional control (Bogaerts, Szmalec, Hachmann, Page, Woumans, et al., 2015).

Other studies have more directly examined visual and auditory attentional abilities in dyslexia, outside WM tasks. Some studies showed deficit in sustained auditory attention in children with dyslexia using the code transmission task of the *Test of Everyday Attention for Children* (Manly et al., 2002) that requires continuous monitoring of an auditory information stream (digits) (Menghini et al., 2011; Varvara et al., 2014). Gabay et al. (2020) demonstrated a deficit in selective auditory attention in dyslexic adults, when they had to focus on a target stimulus and ignore irrelevant information.

Regarding visual attention, deficits for selective attention were again observed in both dyslexic children (Barbosa et al., 2019; Lancaster et al., 2021; Lewandowska et al., 2014; Sireteanu et al., 2008) and adults (Jones et al., 2008) by using various visual-search and target detection tasks. On the other hand, Taran et al. (2022) found non-significant difference in selective visual attention between children with dyslexia and typically developing children in

tasks similar to those used in the studies cited above. A recent meta-analysis concluded that dyslexic children had both lower success rates and slower response times for selective visual attention in visual search tasks (Hokken et al., 2022). In the same vein, Perry and Long (2022) argued that visual attention is a weak but significant predictor of reading ability in dyslexic individuals, by focusing on tasks of VA span, inhibition of return, attentional blink and visual search.

In sum, while there seems to be some consistent evidence for low-level attentional impairment in dyslexia, the role of attentional deficits, and more specifically of attentional control abilities, in WM impairment remains unclear. Importantly, a further look on attentional determinants of WM deficits in dyslexia is also warranted by the distinction between item and serial order aspects of WM (maintenance of individual items – item WM – versus maintenance of the serial order of the items – serial order WM). As briefly noted earlier, children and adults with dyslexia can show impairment for item versus serial order aspects in WM tasks with the serial order WM impairment being furthermore observed in both verbal and visual domains (Cowan et al., 2017; Hachmann et al., 2014, 2020; Martinez Perez et al., 2013; Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012). The question that arises here is whether this domain-general serial order WM impairment, reflects attentional control impairment rather than an intrinsic serial order WM impairment. Encoding of serial order information requires that items are represented in relation to the other items of the memory sequence, while encoding of item information simply requires an individual representation of each item. These item-order binding processes may demand a higher level of attentional control (Majerus, 2009). This is supported by a series of recent studies showing a higher detrimental impact on order memory when attentional control is directed towards item memory than vice-versa (Guitard et al., 2020, 2021). In a similar manner, WM for serial order information has also been associated with spatial attentional processes (Abrahamse et al., 2014; Van Dijck & Fias, 2011). Moreover, given the phonological processing deficits that characterize dyslexia (Ramus & Szenkovits, 2008; Thomson & Goswami, 2008), processing of auditory-verbal items may inherently be more attentionally demanding in individuals with dyslexia. We could thus hypothesize that verbal WM tasks, whether probing item or serial order WM, may depend to a larger extent on attentional control abilities overall in individuals with dyslexia, as compared to non-dyslexic participants. This possibility is indirectly supported by a study by Soroli et al.

(2010) showing particularly pronounced phonological processing deficits in pseudoword discrimination and repetition tasks when WM load and associated attentional control demands are increased.

### **The current study**

The aim of this study was to conduct a comprehensive study on the links between attentional control and WM in dyslexia, by distinguishing between item and order aspects in WM. We administered different tasks with variable attentional control requirements in order to determine whether there is an intrinsic deficit of attentional control in WM in dyslexia or whether this deficit is task-specific, the latter being supported by some of the studies reviewed in this Introduction. A first task was an adaptation of the complex span task used by (Barrouillet et al., 2007; Portrat et al., 2009), the aim being to determine whether children with dyslexia are more impaired when cognitive load increases (i.e., when less time is available for carrying out the secondary task while maintaining a set of memoranda) or when memory load increases (i.e., when the number of stimuli to be stored increases). Further tasks assessing attentional control aspects were the backward digit span task (another complex working memory task) as compared to the simple digit span, and a visual attention span task.

At the level of item and serial order WM tasks, we used tasks that had already been used in previous study with dyslexic participants (Martinez Perez et al., 2013; Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012). Item WM abilities were measured via a single nonword delayed repetition task, requiring the maintenance and recall of a single nonword item, thereby minimizing serial order WM requirement. A more hybrid nonword immediate serial recall was also administered, having both item and serial order recall requirements but with a specific focus on the item recall score. Serial order WM ability was measured via verbal and visual serial order reconstruction task in which highly familiar items were presented repeatedly in different orders and only their serial order had to be retrieved and reproduced at recall (Majerus et al., 2006, 2008). Two different questions were examined. First, we determined whether children with dyslexia are disproportionately impaired in high attentional control conditions relative to the low(er) attentional control conditions for complex span tasks, and whether they show impairment for the visual attention span tasks. Secondly, we selected the attentional control measures for which group effects were observed in the first series of analyses and

used them as covariates for determining whether group effects in item or serial order simple WM tasks persist after controlling for efficiency of attentional control. Finally, phonological processing abilities were also assessed using phonetic perception and phoneme deletion tasks. We determined, using the same logic as for the item and serial order WM tasks, whether deficits in phonological processing tasks may be mediated by difficulties in attentional control for children with dyslexia.

## 2. Method

### Participants

Thirty native French-speaking children with a confirmed dyslexia diagnosis were initially recruited but five children had to be excluded because they did not correspond to the inclusion criteria (see below). The final sample was composed of a group of 25 children with dyslexia (14 boys and 11 girls; age  $M = 146.9$  months,  $SD = 17.6$ ). They were compared to a group of 30 control children without learning disabilities (17 boys and 13 girls; age  $M = 146.9$ ,  $SD = 20.1$ ). All dyslexic children had a diagnosis of dyslexia established by authorized practitioners (ie. speech therapist, neuropsychologist, neuropsychiatrist or school doctor). In addition, their reading age was at least 18 months below their chronological age on a standardized French reading test (Lefavrais, 2005). The dyslexic children and the control children differed on reading age as expected,  $t(53) = 13.12$ ,  $p < .001$ , but were matched for age,  $t(53) = 0.001$ ,  $p = .999$ , receptive vocabulary (Dunn et al., 1993),  $t(53) = 1.731$ ,  $p = .089$ , nonverbal reasoning (Raven et al., 1998),  $t(53) = 1.88$ ,  $p = .064$ , and phonological reproduction abilities (Jacquier-Roux et al., 2005; see *Background tasks*),  $t(53) = 1.56$ ,  $p = .125$ . The characteristics of both groups are shown in **Table 1**.

The following additional inclusion criteria were used for both groups: Normal hearing level, normal or corrected-to-normal vision, no history of psychiatric, attention-deficit hyperactivity or neurological disorder. All children attended a regular school setting in France. A note detailing the procedure of the study was provided to all participants and their parents. Informed consent was obtained from all children and parents before participation in the study. The present study complies with the terms defined by the World Medical Association in the

Declaration of Helsinki regarding ethical principles applicable to research involving human beings, as well as with the specific ethical and legal procedures regarding psychological experiments of the Université Rennes 2.

**Table 1.**

Characteristics of the dyslexic and control groups (means and standard deviations).

	Dyslexics	Controls
Chronological age (months)	146.6 (17.6)	146.6 (20.1)
Reading age (months)	94.8 (14.4)	149.9 (16.3)
Nonverbal reasoning (standardized score)	100.1 (11.5)	105.9 (11)
Receptive vocabulary (standardized score)	111.3 (10.4)	116.3 (10.7)
Phonological reproduction (percentage of correct responses)	90.2 (10)	93.7 (6.3)

## General procedure

The tasks were administered in two separate sessions each lasting approximately 1h30 and included additional measures (not detailed here) as this study was part of a larger study on WM impairment in dyslexia. The tasks were administered in a fixed order for all children, beginning with the reading, language and non-verbal reasoning tasks. Working memory and attention tasks were administered next. The children were assessed individually in a quiet room in their school or at home.

## Materials

### **Background Tasks**

Raven's Colored Progressive Matrices (Raven et al., 1998) were administered to control for general nonverbal reasoning abilities. Receptive vocabulary knowledge was measured using The *Echelle de Vocabulaire en images Peabody* (Dunn et al., 1993); this scale is a French adaptation of the Peabody Picture Vocabulary Test. The standardized scores were used for these two tests. The standardized French reading test « Alouette-R » (Lefavrais, 2005) was used to estimate reading level. This test involves reading a text with 265 words including many

low-frequency words. Participants were instructed to read the text as accurately and fast as possible. Reading age was determined based on the reading accuracy and speed scores. General phonological reproduction abilities were measured using the pseudoword repetition subtest of the standardized ODEDYS-2 battery (Jacquier-Roux et al., 2005) which includes 20 pseudowords. This test comprised 12 pseudowords with simple consonant-vowel structures and 8 pseudowords with a more complex consonant-consonant-vowel and consonant-vowel-consonant structures. The pseudowords had either 2 syllables (n = 7), 3 syllables (n= 8), 4 syllables (n=4) or five syllables (n=1) and were presented progressively from the shortest to the longest. The children were asked to repeat the pseudoword that had just been pronounced by the experimenter. Each item correctly repeated was assigned one point. The dependent variable used for analyses was the proportion of correct responses.

### ***Phonological abilities***

Phonetic perception was measured via two variants of a minimal pair discrimination task (Attout et al., 2012; Majerus et al., 2005; Majerus et al., 2015). Fifty-six pairs of nonsense CV syllables were presented via headphones, at standard (28 pairs) or accelerated speech rates for the two variants (stimuli generated via the TD-PSOLA<sup>®</sup> algorithm implemented in Praat – [www.praat.org](http://www.praat.org)) (28 pairs). In each condition, fourteen pairs had a different initial consonant and fourteen pairs were identical (e.g./ra-ra/). When the initial consonants were different, they differed by one phonetic feature, either voicing (10 pairs) (e.g., /pa-ba/) or place of articulation (18 pairs) (e.g., /ta-pa/). The vocalic context remained constant for all pairs (/a/). All stimuli had been recorded by a female native French speaker. The children were required to listen carefully to each syllable pair and to determine whether they are identical or not, by saying yes or no. The proportion of correct responses over the two versions of the entire task was the dependent variable.

Phonological awareness was assessed by a manipulation task using a phoneme deletion subtest of the EVALEC computerized battery designed to assess phonological processing and reading skills (Sprenger-Charolles et al., 2005). Children listened to a nonword and were instructed to delete the first sound and say the remaining part of the nonword. Thirty-four nonwords were presented via headphones, including 10 bi-syllabic nonwords, 12 monosyllabic nonwords with a consonant-vowel-consonant structure (C-V-C), and 12



monosyllabic nonwords with a consonant- consonant-vowel structure (C-C-V). The dependent variable used was the percentage of correct answers on the thirty-four nonwords of the task.

### **Attentional control**

Attentional control was assessed using three tasks. The first task was an adaptation of the complex WM span task used by Portrat et al. (2009). Sequences of digits from 1 to 9 were presented on a computer screen. Each digit was displayed for 1500 ms and was preceded by a central cross signal for 750 ms. In total, 16 sequences were presented ranging from 2 to 5 digits in length, with four sequences per length. In each sequence, each digit was followed by a series of eight stimuli displayed successively on the screen. These stimuli corresponded to two black squares (side = 18 mm with a visual angle of 2°) randomly displayed on the screen at the upper and lower locations with equal frequency. Each of the eight pairs of squares appeared for 667 ms and was followed by a delay of 333 ms, for a total of 1 s per stimulus. In the distant condition (low cognitive load condition), the two locations were separated by 68 mm (6.5° visual angle), whereas in the close condition (high cognitive load condition), this distance was reduced to 5 mm (0.5° visual angle), creating a 13 mm overlap between the two squares which thus become more difficult to detect. For each digit sequence length, two sequences were associated with each cognitive load condition. The task was administered using Open Sesame (Mathôt et al., 2012). Each sequence began with a first screen indicating the condition (distant vs. close) and the number of digits to be recalled. Next, the first digit was presented on the screen and after a delay of 500 ms, each of the eight pairs of squares was displayed in succession. The next digit then appeared, followed by the next eight pairs of squares, and so on. At the end of each sequence, the word "recall" was displayed on the screen. The children were seated about 60 cm from the computer screen and were instructed to maintain digits, while concurrently performing the spatial judgment task. They had to read aloud and maintain each digits when it appeared, judging the location of each pair of squares as quickly and accurately as possible by pressing the keys marked with a colored dot (left for lower locations and right for upper locations). At the end of each series of digit, the children were required to recall the stored digits in the correct order by saying them. Before beginning the task, children participated in a practice phase of the simple spatial judgment task with 50 stimuli in each condition (close vs. distant) and then completed a complex span training phase

with 3 trials. As already shown in this type of complex WM span task (Barrouillet et al., 2007; Portrat et al., 2009), the close condition induces slower reaction times and lower accuracy than the distant condition, indicating a greater capture of attentional resources and thus a higher cognitive load during the dual task. The proportion of digits recalled in correct order for the distant vs. close spatial judgment conditions was determined, as well as the proportion of correct spatial judgment judgments as a function of WM load (2, 3, 4, and 5 items).

The second task was the digit span subtest of the Wechsler Intelligence Scale for Children Four Edition (WISC-IV, Wechsler). In the forward digit span condition, children had to repeat sequences of digits of increasing length in the correct order. In the backward digit span condition, children had to repeat the sequences of digits in reverse order. If the child failed on both trials for a given length, testing was stopped. The dependent variable was the digit span score for each recall condition (forward vs. backward), corresponding to the last sequence length with at least one correct trial.

The visual-attentional span of the Evadys battery (Valdois et al., 2017) was administered. The stimulus material consisted of 72 test sequences of 6 letters each, pseudorandomly sampled from a set of 12 different consonants (RTPSFHBLDNVC). The strings included no repeated letters and did not correspond to a real word. Two consecutive letters never corresponded to a French grapheme (e.g., PH, TH) or a frequent bigram (e.g., TR, PL, BR). The distance between adjacent letters was  $0.57^\circ$  to minimize crowding. For each trial, a central fixation point was presented for 1000 ms, followed by a blank screen for 50 ms. A horizontal string of six letters was then displayed for 200 ms with a vertical bar, indicating the letter to be reported, displayed below the target letter for 50 ms. Participants were instructed to report only the indicated letter. This task was preceded by a control task in which a single letter was presented quickly on the screen and had to be identified. The task was preceded by 10 practice trials. The dependent variable was the proportion of correct responses.

### ***Item WM***

Item WM information was assessed using two tasks. The first task was an adaptation of the single nonword delayed repetition task (Leclercq & Majerus, 2010; Majerus et al., 2006; Majerus, Poncelet, Greffe, et al., 2006). A total of 30 single monosyllabic nonwords were

presented separately via headphones to the children. At the end of each stimulus, the children had to repeat the nonword to confirm that they had correctly perceived the item and immediately after they were instructed to count forward in steps of 2 for 6 seconds by starting with the digit 1. Then the experimenter asked the children to repeat the stimulus. This task was administered using Open Sesame (Mathôt et al., 2012). The dependent variable was the proportion of nonwords correctly repeated after the 6-second delay. The task was designed to maximize the processing demands of phonological item information and to reduce serial order requirements given that a single, unfamiliar, monosyllabic item had to be repeated.

The second task was an Immediate Serial Recall (ISR) task for nonword lists. Children were asked to recall lists of nonwords in the same order as during their presentation. The nonwords were all mono-syllabic (C-V-C), with a mean phonotactic frequency of 771.10 (range 12 to 3318) for diphones CV and a mean of 788 (range 17 to 2555) for diphones VC. These phonotactic frequencies were determined using the French phonetic database by Tubach and Boë (1990). In total, 32 lists were presented ranging from 2 to 5 items in length, with four lists per sequence length. The lists were presented auditorily at the rate of one item every 1 second. The dependent variable was the proportion of nonwords correctly recalled relative to the total number of nonwords to be recalled. Note that, being part of a larger study, the task also included word list conditions but they are not analyzed in the context of the specific focus on phonological item information in the present study.

### ***Serial order WM***

Serial order WM was assessed for both verbal and nonverbal materials, using serial order reconstruction tasks. The verbal task was an adaptation of the serial order reconstruction task used by Majerus et al. (2015). It consisted of the auditory presentation of digit lists of increasing length. Each list contained 4 to 7 digits, sampled from digits 1 to 7. For a list of length N, only the first N digits were used (e.g., for a list of length 4, the digits 1, 2, 3 and 4 were presented in each trial). For a given sequence length, only the order of the digits varied between trials. After a list was presented, children were requested to reconstruct the order of presentation of the digits, by using cards on which the digits were printed, and by arranging them horizontally on the desk. The number of cards given to the participants

corresponded exactly to the number of digits used in the lists for each sequence length. In total, 24 lists were presented ranging from 4 to 7 items in length, with six lists per sequence length.

The visual serial order reconstruction task was very similar to the verbal task and based on Hachmann et al. (2014). It consisted of a visual presentation of nonsense drawings that had already been used in the study of Hachmann et al. (2014) and that appeared in lists of increasing length. It consisted of the visual presentation of nonsense drawings in lists of increasing length. Each list contained 4 to 7 drawings. For each list length, the same drawings were presented and only their order varied. For each trial in a given sequence length, the same drawings were presented and only their order varied. For a list of length  $N+1$ , the same drawings as for list length  $N$  were used plus one new drawing. As in the verbal serial order task, children responded by horizontally arranging cards representing the drawings on the desk. For both tasks, the use of the same predictable stimuli in each trial ensured that item processing requirements were minimized while serial order processing requirements were maximized. The dependent measure was the proportion of items placed in correct serial position across all trials, per task.

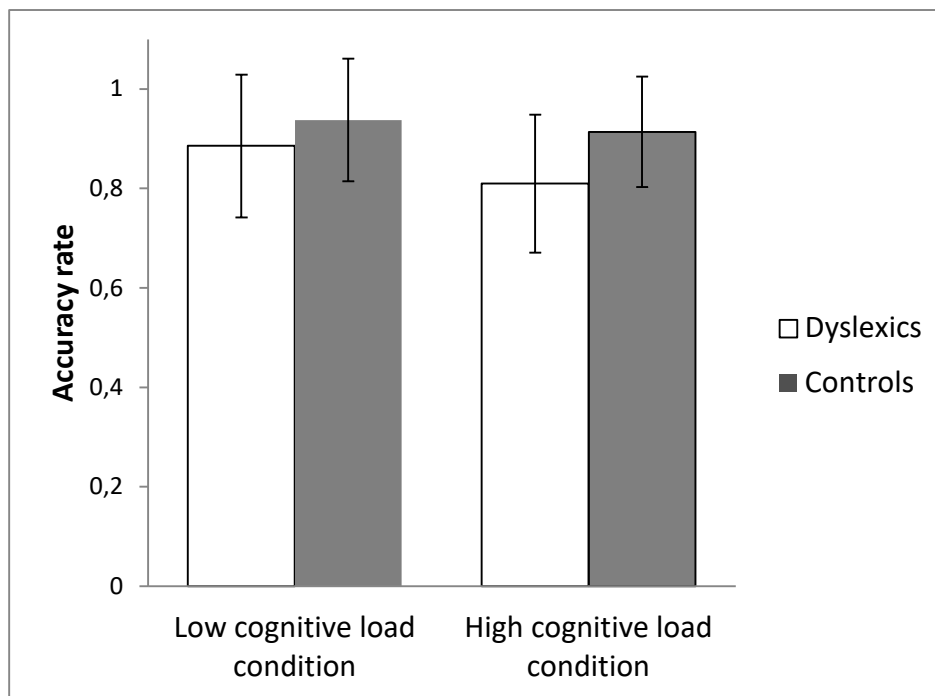
### 3. Results

A first mixed ANOVA examined performance on digit recall performance for the complex WM span task, with the within-subject factor cognitive load (high vs. low) and the between-subject factor group (dyslexic, control). We observed a main effect of group,  $F(1, 53) = 6.26, p < .015, \eta^2_p = .10$ , and of cognitive load (high vs. low),  $F(1, 53) = 10.368, p = .002, \eta^2_p = .164$ , but no significant interaction,  $F(1, 53) = 2.82, p = .099, \eta^2_p = .051$ . As shown in **Figure 1**, the proportion of correctly recalled digits was significantly lower in dyslexic children than in the control group, and this similarly for both load conditions. On the other hand, when conducting the same analysis on the secondary task (spatial judgment), a group-by-condition interaction was observed: group effect,  $F(1, 53) = 20.71, p < .001, \eta^2_p = .281$ ; WM load,  $F(3, 159) = 9.73, p < .001, \eta^2_p = .155$ ; interaction,  $F(3, 159) = 3.56, p = .016, \eta^2_p = .063$ . As shown in **Figure 2**, these results indicate a trade-off between attentional demands of the WM and spatial judgment

tasks that is more pronounced in dyslexic children: they make more spatial judgement errors when more items need to be maintained in WM than do control children (see Figure 1).

**Figure 1.**

Accuracy of correct responses in the complex WM span task as a function of group and secondary task load condition.



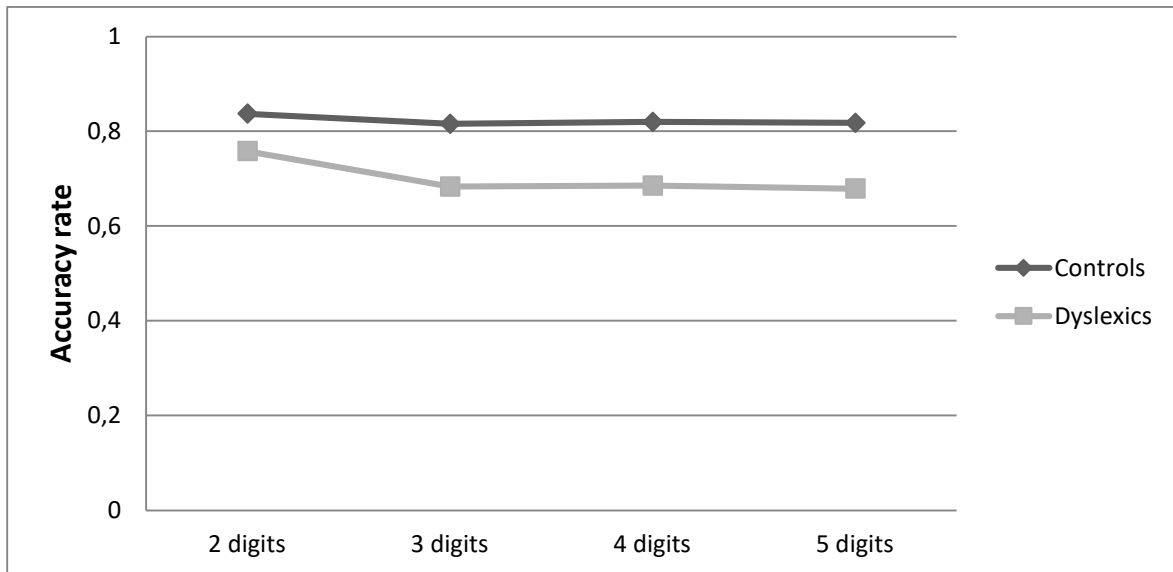
This indicates either a larger recruitment of attentional control processes for carrying out the WM task or more limited attentional control abilities.

For the digit span task, the mixed ANOVA showed a main effect of group,  $F(1, 53) = 30.52$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .365$ , and of recall condition (forward vs. backward),  $F(1, 53) = 67.552$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .560$ , but no significant interaction,  $F(1, 53) = 1.588$ ,  $p = .213$ ,  $\eta^2_p = .029$ . As shown in **Figure 3**, the digit span score was significantly lower in the dyslexic group than in the control group, and this similarly for both recall conditions.

Finally, for the VA span task, a two-sample t-test indicated poorer performance in the dyslexic group relative to the control group,  $t(53) = 3.129$ ,  $p = .003$ ,  $\eta^2_p = .083$ . Results are presented in **Figure 4**.

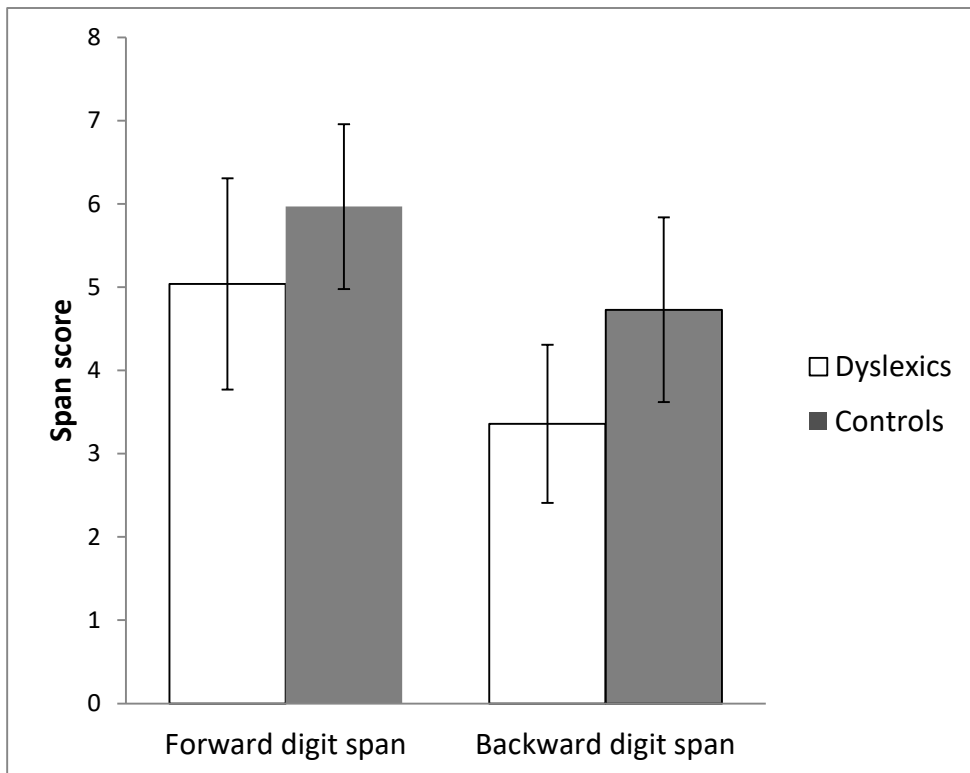
**Figure 2.**

Accuracy for spatial judgment in the complex WM span task as a function of memory load and group.



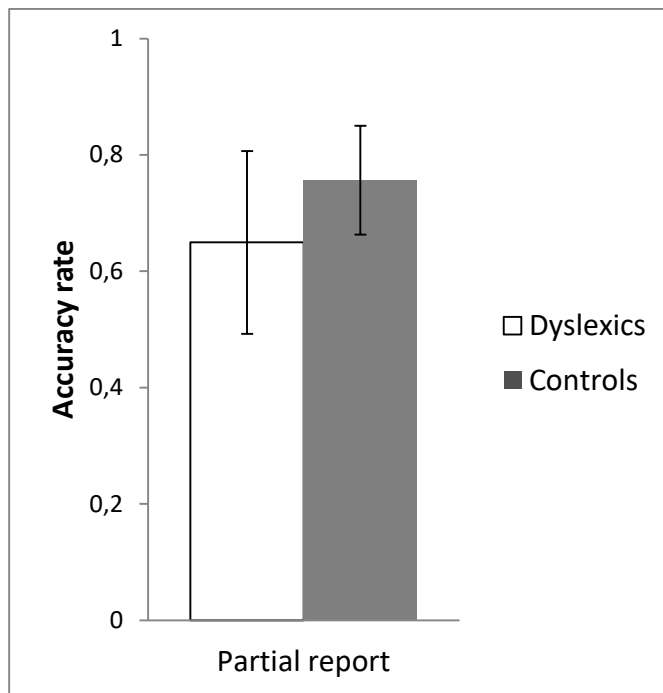
**Figure 3.**

Span score for forward and backward span as a function of group.



**Figure 4.**

Accuracy for the VA span task as a function of group.



Next, we determined whether performance in the item and serial order WM tasks could be explained attentional control abilities. We computed an attentional control index by calculating a composite z-score including the attentional control estimates that had led to significant group effects in the preceding analyses: spatial judgement performance for high (5 digits) minus low (2 digits) memory load and accuracy on the visual attentional span task. Next, both scores were z-transformed and averaged for creating a composite attentional control estimate. This composite z-score was then used as a covariate in the next set of ANOVAs that assessed group effects for the item and serial order WM tasks.

The results of these ANCOVA analyses are presented in **Table 2**. For the nonword delayed repetition tasks, the effect of group was significant, as was the case item recall in the nonword immediate serial recall task. The same situation was observed for the both serial order reconstruction tasks, with significant group effects. In sum, attentional control abilities and deficits did not explain the group effects for item and serial order WM measures.

**Table 2.**

Group effects on item WM, serial order WM and phonological processing tasks with the attentional control index added as a covariate

	Groups		Group effects		
	Dyslexics	Controls	<i>f</i>	<i>p</i>	Effect size ( $\eta^2_p$ )
<b>Item WM tasks</b>					
Item delayed repetition	36.40 (17.3)	60.33 (21.9)	15.69	<.001	.232
Immediate serial recall of nonword	40.85 (9.3)	52.85 (10.1)	12.77	.001	.197
<b>Serial order WM tasks</b>					
Verbal serial order reconstruction	65.39 (12.1)	80.90 (11.7)	14.89	<.001	.223
Nonverbal serial order reconstruction	56.93 (12.4)	73.05 (12.7)	14.81	<.001	.222
<b>Phonological processing tasks</b>					
Minimal pair discrimination	95.35 (4.6)	98.03 (2.2)	2.41	.126	.044
Phoneme deletion	88.23 (10.3)	95.88 (4.6)	11.41	<.001	.210

A second set of ANCOVAs examined the impact of attentional abilities on group effects in phonological processing tasks. As shown in **Table 2**, the ANCOVA revealed no significant group effect. An ANOVA without the attentional control covariate confirmed the presence of a group effect,  $F(1, 53) = 7.792$ ,  $p = .007$ ,  $\eta^2_p = .128$ . For the phoneme deletion task, the group effect was significant in the ANCOVA analyses. In sum, group effects for phonological processing tasks were partially explained by the attentional control deficits in the dyslexic group.

A final set of ANCOVAs explored whether attentional control deficits in dyslexic children could be explained by deficits in item memory and serial order. As shown in **Table 3**, the ANCOVA revealed no significant group effect in the spatial judgment in the complex WM span task for low memory load. However, the group effect remained significant in the spatial judgment in the complex WM span task for high memory load. The same results were observed for the VA span task, with significant group effects. In summary, item and serial



order WM abilities and deficits did not explain the group effects for attentional control measures.

**Table 3**

Group effects on attentional control tasks with the immediate serial recall of nonword task added as a covariate

Tasks	Group effects		
Dependent variable	<i>f</i>	<i>p</i>	Effect size ( $\eta^2_p$ )
<b>Spatial judgment in the complex WM span</b>			
for low memory load (2 digits)	1.64	0.206	0.031
for high memory load (5 digits)	6.67	0.013	0.114
<b>Partial report for VA span</b>			
	8.84	0.004	0.145

## 4. Discussion

This study aimed at examining the nature and role of attentional difficulties in WM impairment in children with dyslexia. We observed inconsistent deficits for a series of attentional control measures. Attentional control deficits are specifically related to memory load control and VA span. Furthermore, performance for the attentional control measures did not account for the group effects observed in item and serial order WM tasks. For phonological processing, group effects in phonetic perception but not in phonological awareness tasks could be accounted by attentional control abilities.

### The nature of attentional difficulties in children with dyslexia

Our results showed an inconsistent deficit in attentional control in the group of dyslexic children. Indeed, there was an increased sensitivity to memory load and a deficit on the VA span task, but we did not find a group effect concerning the sensitivity to cognitive load and attentional control on the backward digit span task.

Evidence of attentional control deficits seems to depend on the measures used. Some studies have shown VA span deficits in dyslexics individual by using only the whole report task which requires storage in verbal WM (Germano et al., 2014; Lobier et al., 2012). Studies found also significant differences between dyslexic and control children on both the whole report and partial report tasks (Bosse et al., 2007; Saksida et al., 2016; Zoubrinetzky et al., 2014). However, other studies found that dyslexic children showed a deficit in the whole report task but not in the partial report task which requires less verbal storage in WM (Bogon et al., 2014; Lallier et al., 2013b; Peyrin et al., 2012). Our results showed that dyslexic children showed a persistent VA span deficit in the partial report task, when we controlled their WM abilities. This suggests that dyslexic children may have a VA span deficit independent of their verbal WM deficit.

Regarding the inconsistent deficit of attentional control in WM in our group of dyslexic children, it appears that the specificity of these deficits depends on the memory load of the tasks. Indeed, we observe a greater sensitivity to memory load in dyslexic children. In addition, when we controlled for item and serial order WM, the attentional control deficit in WM persisted only when the memory load was high. This means that when memory load increases, dyslexic children's attentional resources are less available for a simultaneous processing task, independently of their serial order and item WM abilities. Our results are consistent with several studies that have shown a deficit of attentional control in WM on complex span tasks in dyslexia (Jeffries & Everatt, 2004; Reiter et al., 2005; Sela et al., 2012; Tiffin-Richards et al., 2008), but not with other studies which have observed opposite results when controlling verbal storage capacities in WM (Moura et al., 2015; Schuchardt et al., 2008). In the same line, Barbosa et al. (2019) found a deficit in dyslexic children only on the complex verbal span and not on the complex visual-spatial span task. Nevertheless, these apparently inconsistent data may especially reflect the heterogeneity of WM deficits in dyslexia, as has already been demonstrated (Wokuri et al., 2023). Thus, it is likely that some dyslexics have attentional control deficits, while others do not.

Some data also suggest that attentional control and attentional focus are two distinct but not totally independent functions (Cowan et al., 2006). Attentional control is thought to be involved more specifically in the control of task execution in relation to task demands, with the implementation of strategies for selecting, encoding and maintaining stimuli, as well as

for attentionally refreshing memorized information (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004; Engle, Kane, & Tuholski, 1999; Cowan, 1995). This attentional control may also be associated with certain aspects of the central executive of Baddeley's (1986) model. A second type of attentional mechanism reflects a less strategic aspect of attention, as it more concerned with stimulus focus, corresponding to the attentional focus described by Cowan (1995, 2001) and referring to the limited amount of stimuli an individual can be aware of at any given time. Performance in span tasks and sensitivity to increasing memory load when the number of stimuli to be maintained in WM increases could thus reflect the capacities of this attentional focus. Neuroimaging data also suggest a possible distinction between attentional control and attentional focus. Majerus et al (2018) investigated the role of the dorsal attention network in WM load control and attentional control. They observed that for the verbal WM task, frontotemporal regions were associated with attentional control while superior temporal regions were associated with WM load control.

Regarding our results, the attentional deficit in the group of dyslexic children may be mainly a deficit in attentional focus since it only concerns the VA span and the control of memory load. On the other hand, the absence of increased sensitivity to cognitive load on our complex span tasks could suggest a preservation of attentional control abilities.

### **The specificity of item and serial order WM deficits**

After clarifying the nature of attentional difficulties in our group of dyslexic children, we examined their role in item and serial order WM deficits. Our study showed that item and serial order WM deficits were not explained by attentional control problems in children with dyslexia.

These data support the reality and specificity of item and serial order WM deficits in children with dyslexia. Some studies have shown a distinction between serial order WM and verbal item WM in dyslexic individuals (Martinez Perez et al., 2012, 2013). The WM serial order deficit might be related to deficits in sequential or temporal order processing (Hedenius et al., 2013; Peter et al., 2018; Peter, Albert, & Gray, 2021; Ram-Tsur et al., 2006, 2008) (Keen & Lovegrove, 2000; Martino et al., 2001; Tallal, 1984). The verbal item WM deficit might be due to fewer or lower quality phonological representations (Kibby, 2009), in line with phonological

theory, which considers that dyslexia is the result of an impairment of phonological representations or of impaired access to these representations (Ramus, Marshall, Rosen, & van der Lely, 2013; Ramus & Szenkovits, 2008; Thomson & Goswami, 2008).

### **The relative independence between phonological processing impairment and attentional control**

Regarding the independence between phonological processing impairment and attentional difficulties, our results were mixed. The phonological awareness deficit in children with dyslexia was not explained by attentional control deficits, since a group effect on the phoneme deletion task was still found when controlling for attentional abilities. Our results are in line with the numerous studies that have shown a phonological awareness deficit in dyslexic individuals (De Carvalho et al., 2014; Nergård-Nilssen & Hulme, 2014; Nithart et al., 2009; Ramus, 2003; Ramus, Marshall, Rosen, & Van Der Lely, 2013; Ramus, Pidgeon, et al., 2003). In contrast, phonetic perception deficits in dyslexic children could be accounted for by attentional control abilities, since the group effect on the minimal pair discrimination task disappeared when we added attentional control abilities as a covariate. This suggests that phonemic perception deficits presented by our group of dyslexic children were consecutive to attentional control impairment. This is in line with the hypothesis that dyslexic performed poorly on phonological tasks requiring high WM load (Ramus & Szenkovits, 2008; Soroli et al., 2010). In support of this, it has been suggested that selective attention is significantly involved in speech segmentation and categorization (Holt et al., 2018; Weiss et al., 2010). Another study showed that auditory search performance was associated with the VA span of dyslexic children, but not with their phonological skills (Lallier et al., 2013b).

### **Conclusion**

This study examined the nature and role of attentional processing difficulties in WM and phonological abilities in children with dyslexia. Our results showed a deficit of VA span task and control of memory load. These two impairments were not merely the consequence of item and serial order WM deficits. We observed that item and serial order WM deficits could not be accounted for by attentional control problems. Regarding phonological

processing abilities, deficits in phonetic perception but not in phonological awareness tasks could be accounted for by attentional control abilities. Overall, our results support the specificity of attentional control, item and serial order WM impairment in dyslexia.



# **ETUDE 3 : Remédiation ciblée de la mémoire de travail dans la dyslexie : étude pilote de cas multiples**

Auteurs : Sarah Wokuri, Steve Majerus et Nathalie Marec-Breton

Ce texte est la reproduction d'un article qui sera soumis pour publication

## **1. Introduction**

La dyslexie développementale se caractérise par des difficultés persistantes à identifier et à épeler les mots avec précision ou fluidité, en dépit d'une instruction adéquate et d'une préservation des capacités intellectuelles et sensorielles (Peterson & Pennington, 2015). Bien que certains auteurs considèrent que différents troubles cognitifs peuvent être à l'origine de la dyslexie, la théorie phonologique s'est considérablement imposée ces dernières années (Landerl et al., 2013; Ramus, Marshall, Rosen, & van der Lely, 2013; Ramus & Ahissar, 2012; Soroli et al., 2010). Cependant, des déficits de mémoire de travail (MT) sont fréquemment associés à la dyslexie (Gathercole et al., 2016 ; Jeffries & Everatt, 2004 ; Menghini et al., 2011 ; Tiffin-Richards et al., 2008) et plusieurs études ont montré l'implication de la MT dans l'acquisition du langage écrit (Binamé & Poncelet, 2016; Hachmann et al., 2020; Martinez Perez, Majerus, & Poncelet, 2012; Nithart et al., 2011; Ordonez Magro et al., 2020, 2021). Dans ce contexte, l'identification de stratégies d'intervention efficaces ciblant la MT pourrait constituer un soutien supplémentaire pour les enfants et adolescents dyslexiques. Si les études randomisées proposant une stimulation globale de la MT montrent des résultats peu probants, un entraînement ciblé et modulaire de la MT destiné à des adolescents présentant une dyslexie pourrait s'avérer efficace.

### **Les déficits de MT dans la dyslexie**

Des déficits de MT verbale sont fréquemment mis en évidence chez les personnes dyslexiques (Berninger et al., 2009 ; Gathercole et al., 2006 ; Peng et al., 2018 ; Swanson et al.,

2009, 2010 ; Wang & Gathercole, 2013). Plusieurs auteurs considèrent que ces déficits sont la conséquence du déficit de traitement phonologique qui caractérise la dyslexie (Kibby, 2009). Cependant, les études distinguant les composantes de MT de l'ordre sériel et de l'item ont mis en évidence que les déficits des personnes avec une dyslexie pouvaient concerner aussi bien le maintien de l'ordre sériel que le maintien de l'item (Martinez Perez et al., 2015; Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012). La MT de l'item implique le stockage temporaire des items verbaux ainsi que de leurs caractéristiques phonologiques et lexico-sémantiques (Majerus, 2009 ; Saint-Aubin & Poirier, 1999), tandis que la MT de l'ordre sériel permet de stocker l'ordre sériel dans lequel les éléments ont été présentés, et reposerait davantage sur des codes spatiaux et temporels (van Dijck et al., 2013 ; Abrahamse et al., 2014). Plus récemment, une étude a montré qu'il existait une hétérogénéité des déficits de MT dans la dyslexie (Wokuri et al., 2023). En effet, alors que 48% des enfants dyslexiques de l'étude montraient une préservation de leurs capacités de MT, 16% présentaient un déficit isolé de MT de l'item (sans trouble de la MT de l'ordre sériel), 24% montraient un déficit isolé de la MT de l'ordre sériel (sans trouble de la MT de l'item) et 12% présentaient un double déficit.

### **La remédiation des déficits de MT**

Concernant la remédiation des déficits de MT, plusieurs outils informatisés de stimulation globale ont été développés en ciblant généralement de manière indifférenciée les différentes composantes du modèle de Baddeley (1986) : boucle phonologique, calepin visuospatial et administrateur central. Néanmoins, les méta-analyses ont montré des effets faibles avec peu de transfert sur les apprentissages, voire une absence d'efficacité de ces entraînements auprès d'enfants, d'adolescents et d'adultes avec ou sans trouble du neurodéveloppement (Bharadwaj et al., 2022; Melby-Lervåg et al., 2016; Melby-Lervåg & Hulme, 2013; Sala & Gobet, 2017, 2020; von Bastian & Oberauer, 2014). Les effets de ce type d'entraînement semblent être similaires chez les personnes dyslexiques. Après un programme de stimulation globale, Shiran & Breznitz (2011) ont observé une amélioration des performances de MT et de lecture dans un groupe de normo-lecteurs et de jeunes adultes avec des antécédents de troubles de la lecture. Cependant, les différences entre les deux groupes restaient stables pouvant ainsi révéler des effets test-retest plutôt que d'une amélioration des capacités de MT. Dans une étude réalisée auprès d'enfants dyslexiques et



d'enfants normo-lecteurs, Maehler et al., (2019) constatent que les faibles effets significatifs d'un entraînement global des capacités de MT ne se maintiennent pas sur le long terme. Cependant, l'approche par stimulation globale de la MT comporte plusieurs limites qui compliquent l'interprétation de ces résultats. En effet, il s'agit d'une approche qui ne prend pas en compte l'aspect modulaire des différents mécanismes qui sous-tendent la MT et la possibilité que ces mécanismes soient perturbés de façon sélective (Majerus, 2016). De plus, des effets différentiels de l'entraînement de la MT pourraient être observés en fonction des capacités initiales des participants, de sorte que les individus ayant une plus grande marge de progression montrent des améliorations plus importantes (von Bastian & Oberauer, 2014). Dans ce contexte, il est difficile d'exclure qu'au sein des groupes cliniques des études randomisées, une partie des participants n'avaient pas de déficit sur les composantes de MT entraînées, ce qui pouvait ainsi limiter les effets de la remédiation à l'échelle du groupe. Concernant la remédiation de la MT dans la dyslexie, les études de Maehler et al. (2019) et de Shiran & Breznitz (2011) citées précédemment ont proposé un entraînement global de MT incluant beaucoup d'exercices visuo-spatiaux, sans prendre en compte les profils individuels des déficits de MT. Comme les déficits des personnes dyslexiques concernent davantage les aspects phonologiques et sériels de la MT, il est cohérent que les effets de ces deux types d'entraînement soient limités puisqu'ils ne ciblaient pas spécifiquement ces composantes de la MT. De plus, au regard de l'hétérogénéité des déficits de MT dans la dyslexie, il est possible que certains enfants dyslexiques aient bénéficié d'un entraînement alors qu'ils ne présentaient aucun déficit de MT, limitant ainsi les effets de la remédiation à l'échelle du groupe.

Les études de cas uniques ou multiples associées à une approche cognitive ciblant une composante spécifique de la MT pourraient permettre de contourner les limites méthodologiques évoquées précédemment, en tenant compte de l'aspect modulaire de la MT et des capacités initiales des individus. A travers des études de cas uniques ou multiples, il s'agit de prendre en compte les déficits spécifiques de MT des participants afin de leur proposer une remédiation ciblée. Quelques études ont montré des effets significatifs d'une remédiation de la MT chez des adultes cérébrolésés en utilisant cette approche méthodologique (Majerus, 2018; Majerus et al., 2016). En revanche, les études ayant utilisé l'approche cognitive en ciblant spécifiquement certains aspects de la MT restent rares chez

les enfants (Majerus, 2021). Stanford et al., (2019) ont créé un programme d'entraînement de la MT avec des activités ciblant l'ordre sériel, la MT verbale ainsi que les capacités de contrôle attentionnel. Après avoir bénéficié de ce type d'entraînement, des enfants avec un TDL ont montré des améliorations significatives sur des tâches d'empans simples et complexes ainsi que sur la production correcte de pronoms clitiques, à la différence du groupe contrôle qui avait participé à des jeux éducatifs informatisés durant l'entraînement contrôle. Ce programme a également eu des effets significatifs sur les performances en répétition de phrases complexes chez des enfants TDL, plus particulièrement concernant les syllabes correctement répétées, la production de structures syntaxiques correctes ainsi que le respect du degré d'enchâssement des subordonnées relatives (Delage et al., 2021). Delage et al., (2023) ont également observé que les enfants TDL qui avaient participé à l'entraînement augmentaient leur production de phrases complexes en langage spontané, en énonçant davantage de phrases comportant des enchâssements simples et multiples afin d'utiliser des subordonnées relatives. Bien que ce programme de remédiation ait montré des effets significatifs sur la MT et un transfert sur d'autres capacités non entraînées, il reste difficile de déterminer précisément si ces effets étaient spécifiquement liés à l'entraînement du contrôle attentionnel, de la MT de l'item ou de la MT de l'ordre sériel.

Concernant plus spécifiquement la remédiation de la MT de l'item, Swanson et al. (2010) ont montré que l'entraînement à une stratégie de récapitulation articulatoire (RA) améliorait les performances sur des tâches de MT verbale chez des enfants avec ou sans trouble de la lecture. Cette stratégie de RA consistait à demander à l'enfant de répéter à voix haute autant de fois que possible les items à mémoriser jusqu'à ce que leur rappel soit demandé. Toutefois, les auteurs observaient toujours des différences significatives en MT verbale entre les deux groupes après l'entraînement. Ces résultats suggèrent que si la stratégie de RA peut permettre aux enfants avec des troubles de la lecture de compenser une partie de leurs difficultés de MT sur des tâches spécifiques, elle n'augmente pas pour autant leurs capacités de MT. Closset et Majerus (2007) ont également développé une stratégie de compensation des déficits de MT de l'item auprès d'une enfant cérébrolésée de 10 ans. Les auteurs ont appris à l'enfant à se créer des images mentales visuelles afin de recoder les informations à mémoriser sur le plan visuel et sémantique. Après la remédiation, des effets significatifs étaient observés puisque l'enfant montrait des performances dans les normes sur

les tâches d'empans de chiffres et de mots, tandis que le déficit de MT persistait pour les empans de non-mots qui ne pouvaient pas être recodés visuellement et sémantiquement. La remédiation de la MT de l'item peut aussi viser à restaurer le maintien à court terme des représentations phonologiques en MT (Majerus et al., 2016). Il s'agit de proposer un entraînement au maintien à court terme de l'item phonologique ou sémantique avec des exercices de répétition immédiate ou différée d'informations phonologiques (mots ou non-mots). Plusieurs travaux ont montré des effets significatifs de ce type d'approche chez des adultes cérébrolésés (voir Majerus, 2018, pour une revue détaillée).

En ce qui concerne la remédiation des déficits de MT de l'ordre sériel, Smith (2015) a utilisé une stratégie de codage spatial, auprès de personnes avec un syndrome de Down qui présentaient un déficit dans les tâches d'empans verbaux afin de les aider à structurer spatialement le rappel sériel d'informations. Il s'agissait d'associer les mots d'une liste à mémoriser avec des objets positionnés au bord d'un chemin qui traversait le paysage de gauche à droite, en suivant l'ordre séquentiel des mots et l'alignement des objets de gauche à droite. Cette grille visuo-spatiale était également utilisée lors du rappel durant lequel les participants devaient resituer de manière linéaire le mot qui était associé à chaque objet sur le paysage. La chercheuse a observé une augmentation significative du nombre de mots correctement rappelé dans l'ordre.

En résumé, l'efficacité de la remédiation des déficits de MT dans les troubles neurodéveloppementaux et plus particulièrement dans la dyslexie est un domaine de recherche qui nécessite encore des investigations. Il s'agit notamment de déterminer si le peu de résultats probants s'expliquent par une résistance des déficits de MT à l'entraînement ou par les limites méthodologiques qui ne tiennent pas suffisamment compte de l'aspect modulaire de la MT et de l'hétérogénéité des déficits des personnes avec une dyslexie. L'objectif de la présente étude est d'explorer l'efficacité avec une étude de cas multiples d'une remédiation ciblée sur la MT de l'ordre sériel et la MT de l'item pour les informations phonologique chez des adolescents dyslexiques, en prenant en compte l'hétérogénéité des déficits qui existe au sein de cette population. Plus précisément, nous avons étudié si les capacités de MT de l'item phonologique des adolescents dyslexiques pouvaient être améliorées grâce à un entraînement au maintien de l'information phonologique en MT associé à une stratégie de RA et de codage visuel des informations phonologiques. Nous avons

également exploré si les capacités de MT de l'ordre sériel des adolescents dyslexiques pouvaient augmenter à la suite d'un entraînement au maintien de l'ordre sériel associé à une stratégie de codage spatial de l'information sérielle. Enfin, il s'agissait d'investiguer les effets de ces entraînements sur les apprentissages tels que la lecture, mais également le calcul mental et la résolution de problèmes qui sont aussi corrélés aux capacités de MT (Gathercole et al., 2016).

## 2. Méthode

### Participants

Six adolescents devaient initialement participer à cette étude, mais deux d'entre eux ont souhaité se retirer dans le contexte de la crise sanitaire liée au Covid 19. Quatre adolescents âgés de 12 à 14 ans ont donc participé à cette étude. Les critères d'inclusion étaient les suivants : 1) enfants/adolescents avec un diagnostic de dyslexie ; 2) ayant bénéficié d'une prise en charge orthophonique durant au moins deux ans ; 3) présentant un trouble de la MT de l'ordre sériel et/ou de la MT de l'item. Les participants de bénéficiaient plus d'une rééducation orthophonique lorsqu'ils se sont engagés dans l'études. Tous les adolescents avaient une vision normale ou corrigée, un niveau d'audition normal et aucun d'entre eux ne présentait d'antécédents de troubles neurologiques, psychiatriques ou un trouble développemental du langage oral. Tous les participants ont bénéficié d'une évaluation initiale environ 1 an avant la remédiation. **Le Tableau 1** présente les caractéristiques des quatre participants. Les capacités de MT de l'item ont été évaluées en utilisant une épreuve de répétition différée de non-mots avec une tâche interférente, ainsi qu'une tâche de rappel sériel immédiat (RSI) de mots et de non-mots. La MT de l'ordre sériel a été évaluée avec une tâche de reconstruction d'ordre sériel de symboles et une tâche de reconstruction d'ordre sériel de chiffres. L'ensemble de ces tâches de MT ont fait l'objet d'un étalonnage continu (Zachary & Gorsuch, 1985) dans une précédente recherche (Wokuri et al., 2023) et plusieurs études ont fait une description complète de ces différents outils d'évaluation de la MT (Leclercq & Majerus, 2010; Majerus, Poncelet, Elsen, & Van Der Linden, 2006; Wokuri et al., 2023). Nous avons également utilisé le subtest de mémoire de chiffres du WISC-V afin d'obtenir une mesure générale des capacités de MT. Enfin, les matrices de Raven ont été

utilisées pour évaluer les capacités de raisonnement non verbal, l'EVIP ((Raven et al., 1998) pour le vocabulaire réceptif et le test de l'alouette (Lefavrais, 2005) a permis de déterminer un âge de lecture.

Pour chaque adolescent, nous avons calculé un z-score composite pour la MT de l'item (en faisant la moyenne des z-scores corrigés en fonction de l'âge pour la tâche de répétition différée des items ainsi que les scores de rappel des items ISR de mots et de non-mots) et un z-score composite pour la MT de l'ordre sériel (en faisant la moyenne des z-scores corrigés en fonction de l'âge pour les tâches de reconstruction de l'ordre sériel verbal et de reconstruction de l'ordre sériel visuel).

Les résultats de RB sur les tâches de MT montraient un déficit plus spécifique en MT de l'item tandis que la MT de l'ordre sériel était préservée. AF présentait un déficit plus marqué en MT de l'item. Concernant les résultats de MV, le déficit était plus marqué en MT de l'ordre sériel comparativement à la MT de l'item. BL présentait des déficits à la fois en MT de l'ordre sériel et en MT de l'item.

Tableau 1. Caractéristiques des adolescents dyslexiques

	<b>RB</b>	<b>AF</b>	<b>MV</b>	<b>BL</b>
Genre	masculin	féminin	féminin	féminin
Age chronologique	12; 6	13;9	13;10	14 ;11
Age de lecture (Alouette)	7;2	8;6	7;11	7;4
Matrices de Raven (score normalisé)	115	103	85	102
EVIP (score normalisé)	130	97	114	98
Z-score composite MT de l'item	-1,94	-1,79	-1,04	-1,9
Z-score composite MT de l'ordre sériel	-0,71	-1,48	-3,67	-3,34
MCD du WISC-V (Note standard)	9	9	5	1
MCI du WISC-V (Note standard)	8	4	5	3

## Evaluations pré et post remédiation

Les évaluations pré et post-remédiation ont été menées pour constituer des lignes de base afin d'objectiver les éventuels effets d'une remédiation de la MT. Afin de calculer les tailles d'effet individuel, quatre évaluations constituant les lignes de bases ont été réalisées : deux évaluations avant la remédiation (LB1 et LB2) et deux évaluations après la remédiation (LB3 et LB4). L'ensemble des évaluations a été administré à distance en raison de la crise sanitaire liée au covid-19. La LB1 a été réalisée deux mois avant l'intervention et la LB2 deux semaines avant l'intervention. La LB3 et la LB4 ont été réalisées dans un délai de deux semaines après l'intervention. Nous avons utilisé différents types de mesures pour évaluer l'effet de la remédiation concernant le transfert proche (tâches similaires ou identiques au matériel d'entraînement), le transfert intermédiaire (tâches de MT qui diffèrent moyennement du matériel d'entraînement) et le transfert distant (tâches qui diffèrent considérablement du matériel d'entraînement). Nous avons également déterminé des tâches contrôles pour les mesures sur lesquelles nous n'attendions pas d'effets au regard du type de remédiation proposée. Le **Tableau 2** reprend l'ensemble des tâches d'évaluation utilisées pour les quatre LB en fonction du type de remédiation et du type de mesures.

Tableau 2. Tâches de références pour les évaluations pré et post-remédiation en fonction du type de remédiation

		Tâches			
Type de remédiation	Adolescents	Transfert proche	Transfert intermédiaire	Contrôles	Transfert distant
MT de l'item	RB et AF	Répétition différée de non-mots	RSI de mots et de non-mots	Reconstruction de l'ordre sériel de chiffres et de symboles	Empans complexes ; résolution de problèmes ; calcul mental ; lecture (vitesse et exactitude)
MT de l'ordre sériel	MV et BL	Reconstruction de l'ordre sériel de chiffres	RSI de mots et de non-mots ; reconstruction de l'ordre sériel de symboles	Répétition différée de non-mots	

Note. RSI : rappel sériel immédiat

Des versions parallèles ont été créées pour l'ensemble des tâches de MT afin de limiter les effets d'apprentissage avec la passation de lignes de bases successives. Concernant les tâches de MT de l'item, nous avons procédé à un appariement des stimuli au niveau de la fréquence phonotactique, du degré d'imagerie et de la fréquence lexicale sur l'ensemble des versions parallèles. Le transfert distant a été évalué avec quatre tâches. Pour évaluer le contrôle attentionnel en MT, nous avons utilisé une tâche d'empan complexe dans laquelle les participants devaient mémoriser et rappeler des séries de chiffres tout en réalisant une tâche de jugement spatial. La vitesse et l'exactitude en lecture ont été évaluées avec la tâche MIM de la BELEC et sa version parallèle. La tâche de résolution de problèmes arithmétiques du ZAREKI-R ainsi que la tâche de calcul mental du TEDI-MATH ont été utilisées pour mesurer le transfert sur certaines compétences en mathématiques. Des versions parallèles ont été proposées pour l'ensemble des tâches de transfert distant.

## **Entraînements**

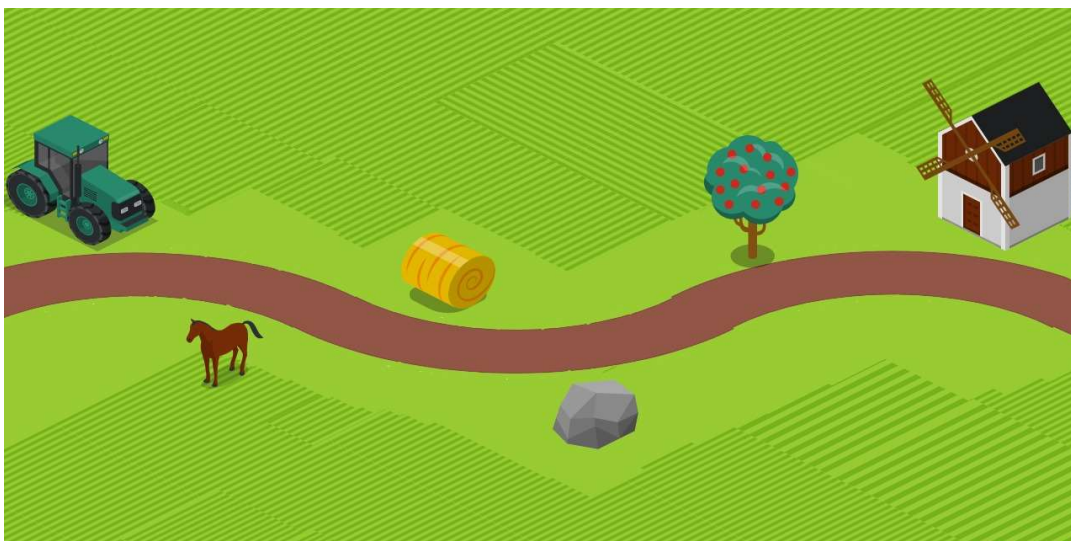
RB et AF ont bénéficié d'une remédiation ciblant la MT de l'item tandis que MV et BL ont bénéficié d'un entraînement ciblant la MT de l'ordre sériel pendant 9 semaines. Au total, neuf séances d'une heure ont été proposées à chaque participant en distanciel, compte-tenu de la crise sanitaire liée aux covid-19.

**Remédiation de la MT de l'ordre sériel.** L'objectif de la remédiation de la MT de l'ordre sériel était d'amener les participants à développer une stratégie de codage spatial des informations en MT de l'ordre sériel, au regard des études qui ont montré que le codage de l'ordre sériel en MT s'appuyait en partie sur des codes spatiaux (Rasoulzadeh et al., 2021; Van Dijck et al., 2013). Il a ainsi été proposé aux deux adolescents d'apprendre à se représenter mentalement les différents items de gauche à droite sur un chemin bordé d'images, afin que l'ordre des informations à mémoriser soit associé à une position. Le support visuo-spatial est illustré sur **la Figure 1**. Deux types d'exercices étaient proposés. Dans la tâche de reconnaissance de l'ordre sériel, il était demandé à l'adolescent de déterminer si une série de stimuli (couleurs) présentée auditivement par l'ordinateur était dans le même ordre que la série cible présentée initialement. Dans la tâche de reconstruction d'ordre sériel, il était demandé de remettre les séries de couleurs dans l'ordre à l'aide de cartes sur l'écran d'ordinateur après leur présentation auditive. Au cours d'une séance, le nombre de stimuli

présentés était évolutif (de 3 à 6) et augmentait lorsque les participants atteignaient 80 % de réussite sur un total de 20 essais. La remédiation comportait quatre phases.

1. La première phase consistait en l'apprentissage de l'association ordre-position sur un support visuo-spatial. Pendant que les couleurs étaient énoncées, elles apparaissent successivement à l'écran sur le chemin de gauche à droite au niveau des différentes images (1 séance).
2. La seconde phase comportait un apprentissage du codage spatial en MT de l'ordre sériel sur un support visuo-spatial avec indiçage. Pendant que les stimuli étaient énoncés, des points apparaissent séquentiellement à l'écran sur les images autour du chemin de gauche à droite (2 séances).
3. La troisième phase proposait un apprentissage du codage spatial en MT de l'ordre sériel sur un support visuo-spatial sans indiçage. Pendant que les couleurs étaient énoncées, il était demandé à l'adolescent de se représenter mentalement les couleurs sur le chemin qui était sur l'écran d'ordinateur (3 séances).
4. La dernière phase consistait à l'apprentissage du codage spatial en MT de l'ordre sériel en imagerie mentale. L'objectif de cette phase était que l'adolescent automatise la stratégie de codage spatial de l'information « ordre sériel » sans s'appuyer sur un support visuel. Pendant que les couleurs étaient présentées auditivement, il était demandé à l'adolescent de se représenter mentalement les stimuli sur le chemin en imagerie mentale en les associant aux images autour du chemin (3 séances).

**Figure 1.** Support visuo-spatial utilisé pour l'entraînement de la MT de l'ordre sériel





**Remédiation de la MT de l'item.** L'objectif de cette remédiation était d'amener l'adolescent à développer une stratégie de RA et de codage visuel des informations phonologiques en MT de l'item, en l'associant à un entraînement au maintien de l'information phonologique en MT. Il a ainsi été proposé à l'adolescent d'apprendre à se représenter mentalement un visage en train d'articuler les différentes syllabes des items à mémoriser. Deux types d'exercices étaient proposés à partir de la seconde phase. Dans la tâche de reconnaissance, il était demandé à l'adolescent de déterminer si un non-mot monosyllabique présenté était similaire à un item cible présenté précédemment. Dans la tâche de répétition, l'adolescent devait répéter un non-mot monosyllabique après un bref délai comportant une tâche interférente. La remédiation comportait quatre phases.

1. L'objectif de cette première phase était que l'adolescent puisse se familiariser avec les associations sons-articulation afin que cette stratégie soit mobilisable pour l'entraînement de MT de l'item phonologique. Sur la première partie de la séance, l'adolescent entendait un non-mot monosyllabique avec la présentation d'un visage en train de produire l'articulation sur l'écran. Le même non-mot était ensuite proposé avec un visage en train d'articuler et l'adolescent devait déterminer si l'articulation était congruente, autrement dit si elle correspondait à celle présentée initialement. Dans les cas non congruents, la bonne association était à nouveau montrée. Sur la seconde partie de la séance, il était demandé à l'adolescent de déterminer si le non-mot énoncé par l'adulte après une tâche interférente était identique à celui présenté initialement. Pendant que le non-mot cible était énoncé, l'adolescent regardait le visage de l'adulte en train d'articuler ce non-mot. Il était ensuite demandé au participant de répéter ce non-mot le plus de fois possible devant la caméra de son ordinateur (ce qui lui donnait un retour visuel sur son articulation) pendant 6 secondes, jusqu'à ce qu'un calcul simple à résoudre apparaisse sur l'écran (ex :  $3 + 1$ ). Après cela, un non-mot était énoncé par l'adulte et l'enfant devait déterminer s'il s'agissait du non-mot cible. Ainsi, la stratégie de RA était proposée en association avec le codage visuel d'une information phonologique (1 séance).
2. Dans cette seconde phase, l'adolescent était entraîné au codage visuel de l'information phonologique, en utilisant une stratégie de RA supplée par un support

visuel correspondant au retour visuel de sa propre articulation sur l'écran d'ordinateur (2 séances).

3. Dans la troisième phase, il s'agissait d'amener l'adolescent à remplacer le support visuel (son articulation sur l'écran) par son imagerie mentale. Autrement dit, il devait se représenter mentalement l'articulation du non-mot pendant le processus de RA (3 séances).
4. L'objectif de cette dernière phase était que l'adolescent automatise la stratégie de codage visuel de l'information phonologique en se représentant mentalement l'articulation des non-mots. Il s'agissait de réduire progressivement le temps de RA, afin que l'adolescent optimise sa stratégie de codage visuel, en se représentant mentalement l'articulation des non-mots de plus en plus rapidement (3 séances).

### **3. Résultats**

#### **Traitement des données**

Nous avons analysé nos résultats en étudiant les tailles d'effet ainsi que l'évolution des z-scores. Les tailles d'effet ont été calculées à l'aide de l'estimateur de taille d'effet individuel proposé par Beeson & Robey (2006) spécifiquement pour les études à cas unique :  $d_i = (\text{moyenne-post intervention} - \text{moyenne pré intervention}) / \text{écart-type pré intervention}$ . Cet estimateur de taille d'effet est basé sur le d de Cohen (Cohen, 1988), mais la variation moyenne de l'intervention est comparée uniquement à la variance avant l'intervention plutôt qu'à la variance sur les périodes pré et post intervention. Ces tailles d'effet individuel peuvent être calculées à partir d'au moins deux mesures avant et deux mesures après l'intervention. Afin d'éviter tout biais dans le calcul de la taille d'effet dû à des mesures utilisant des échelles différentes, toutes les mesures ont été converties soit en pourcentage de réponses correctes soit en temps de réponse moyen par item. Nous n'avons pas utilisé les critères de Cohen pour considérer les effets comme petits ou grands, car ces critères ont été établis uniquement pour les études de groupe. Sur la base de la distribution des tailles d'effet observées dans 12 études de cas unique ciblant l'alexie et l'agraphie chez des adultes cérébrolésés, il a été proposé qu'une taille d'effet de 2 corresponde à une petite taille d'effet (Beeson et al., 2005; Beeson & Egnor, 2006). Cependant, ces repères plus spécifiques permettent seulement de déterminer

si une taille d'effet donnée est importante par rapport à d'autres études ayant traité le même type de déficit chez le même type de patients (Majerus, 2018). Par conséquent, les références existantes ne peuvent pas être facilement généralisables à d'autres populations et à d'autres cibles d'intervention telles que la MT (Majerus, 2018). Aussi, nous avons également utilisé des mesures contrôles pour les lignes de base sur lesquelles nous n'attendions pas d'effets. Pour les adolescents ayant bénéficié d'une remédiation de la MT de l'item, il s'agissait d'étudier l'évolution des performances sur des tâches de MT moins spécifiques censées rester stables après l'intervention telles que la reconstruction de chiffres et de symboles. Pour les participants ayant bénéficié d'une remédiation de MT de l'ordre sériel, les performances étaient censées rester relativement stables sur la tâche de répétition différée de non-mots.

Pour Majerus (2018), les effets d'une intervention pour un patient donné peuvent être considérés comme faibles (par rapport à d'autres patients avec un type de déficit similaire) alors qu'ils peuvent néanmoins refléter une amélioration cliniquement significative après l'intervention. Inversement, une grande taille d'effet ne reflète pas nécessairement une amélioration significative de la performance de la MT, puisque des changements très petits changements dans les scores peuvent conduire à de grandes tailles d'effet lorsque la variance avant traitement est très faible.

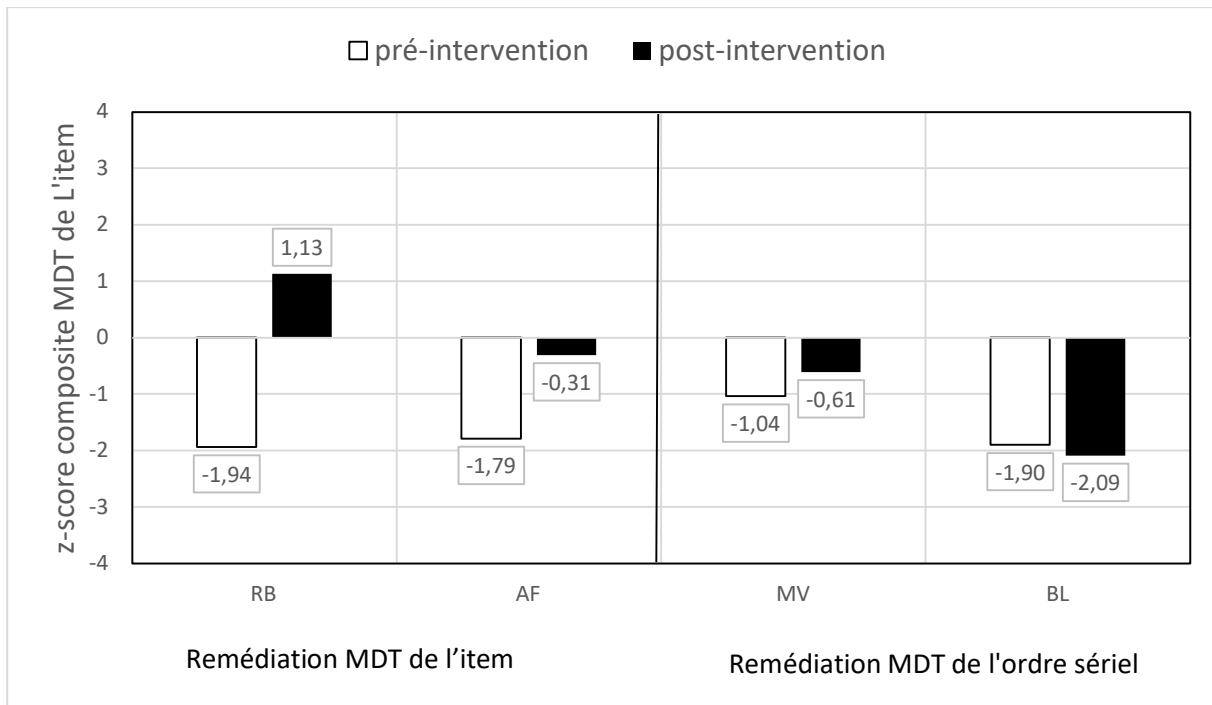
Dans ce contexte, nous avons donc complété les *di* avec une analyse des améliorations cliniquement significatives sur la base de l'évolution des z-scores pré et post intervention. Nous avons donc calculé des z-scores composites de MT de l'item et de l'ordre sériel avant l'intervention et après l'intervention basés sur les tâches ayant fait l'objet d'un étalonnage continue, comme mentionné dans la section Participants.

### **Effets de la remédiation de la MT de l'item**

La **Figure 2** représente les z-scores composites obtenus par les participants en MT de l'item lors de l'évaluation initiale et de celle réalisée après la remédiation. Concernant RB, une amélioration des performances est observée après l'intervention, avec un z-score composite de MT de l'item dans la norme contrairement à l'évaluation initiale. La **Figure 3**, montre une taille d'effet de 1 pour les tâches contrôles et une taille d'effet de 7,61 pour la tâche de transfert proche de MT de l'item, à modérer toutefois compte tenu de la faible variabilité sur les lignes de base pré-intervention. La taille d'effet pour les tâches de transfert intermédiaire

est de 1,45 et de 1,27 pour la tâche d'empans complexes. Concernant la lecture, la taille d'effet est de 2,86 pour l'exactitude et de 3,93 pour la vitesse. Les tâches de calcul mental et de résolution de problèmes montrent respectivement des tailles d'effets de 1,16 et 1,69.

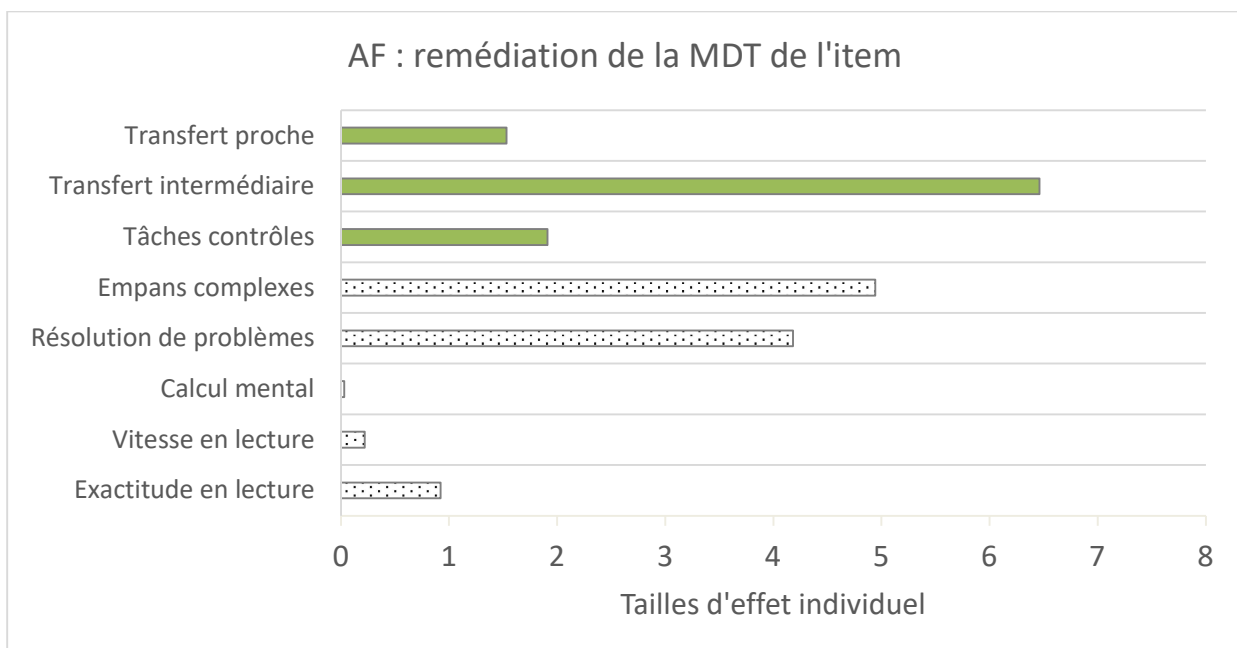
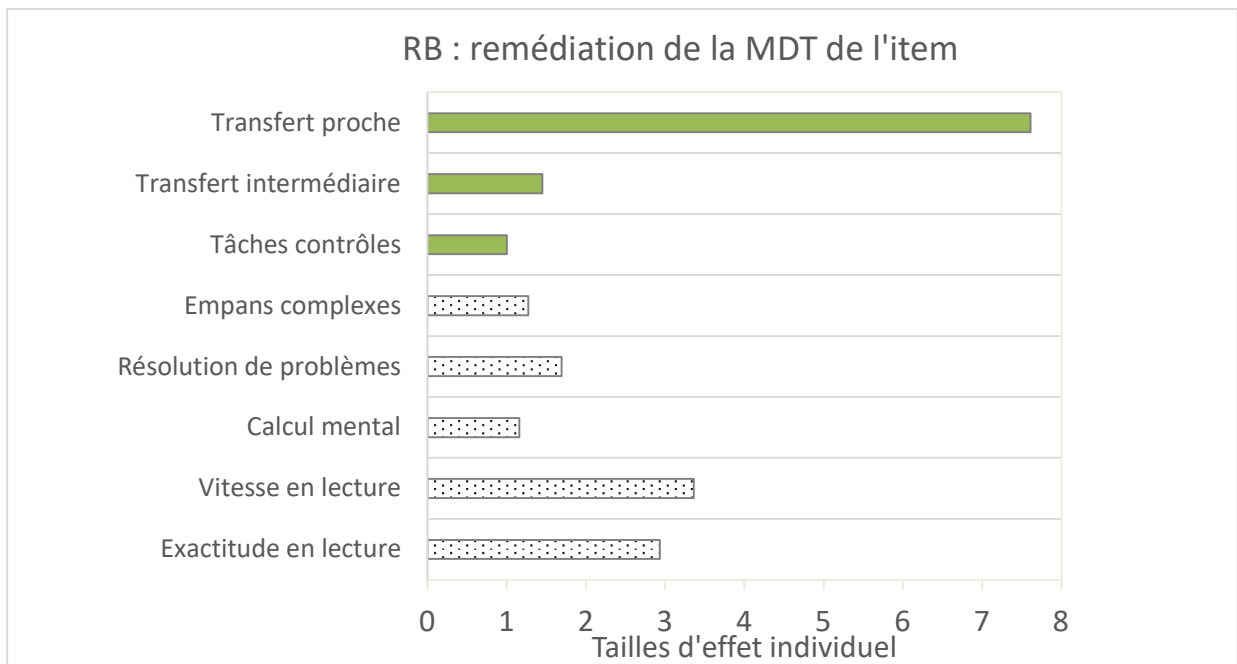
**Figure 2.** Z-scores composite de MT de l'item pré-intervention et post-intervention des 4 adolescents.



Concernant AF, le z-score composite de MT de l'item sur la **Figure 2** se situe dans la norme après l'intervention par rapport à l'évaluation initiale. La **Figure 3** montre une taille d'effet de 1,53 pour la tâche de transfert proche et de 6,46 pour le transfert intermédiaire, tandis qu'une taille d'effet de 1,91 est observée sur les tâches contrôles. Concernant le transfert distant, des tailles d'effet inférieures à 1 sont observées pour la lecture et le calcul mental tandis que nous relevons une taille d'effet de 4,18 pour le calcul mental et de 4,94 pour la tâche d'empans complexes.

Concernant les deux adolescents qui avaient bénéficié d'un entraînement de la MT de l'ordre sériel, le z-score composite de MT de l'item reste dans la zone pathologique pour BL et reste situé entre -1,05 et -0,5 chez MV après l'entraînement.

**Figure 3.** Effet de l'entraînement pour les adolescents ayant bénéficié d'une remédiation ciblée de la MT de l'item (tailles d'effet individuel).

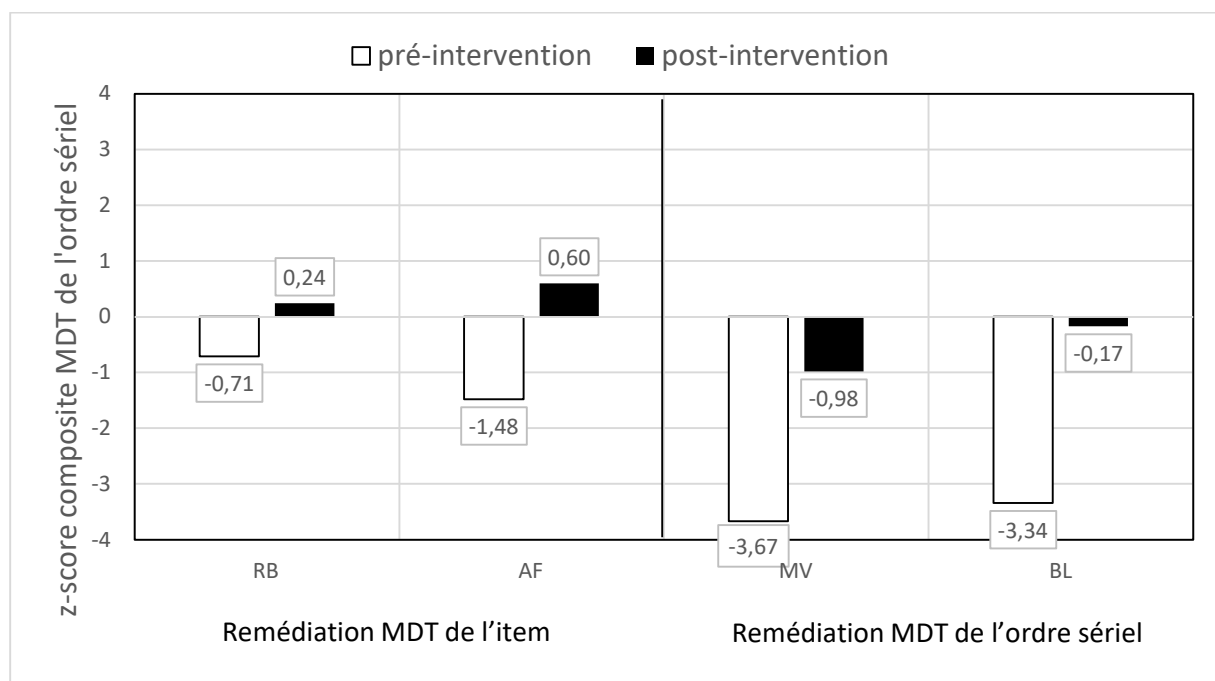


*Note.* Les tâches en pointillées correspondent aux tâches de transfert distant ; transfert proche : tâche de répétition différée de non-mots ; transfert intermédiaire : tâche de rappel sériel immédiat de mots et de non-mots; tâche contrôle : reconstruction de l'ordre sériel de chiffres et de symboles

## Effets de la remédiation de la MT de l'ordre sériel

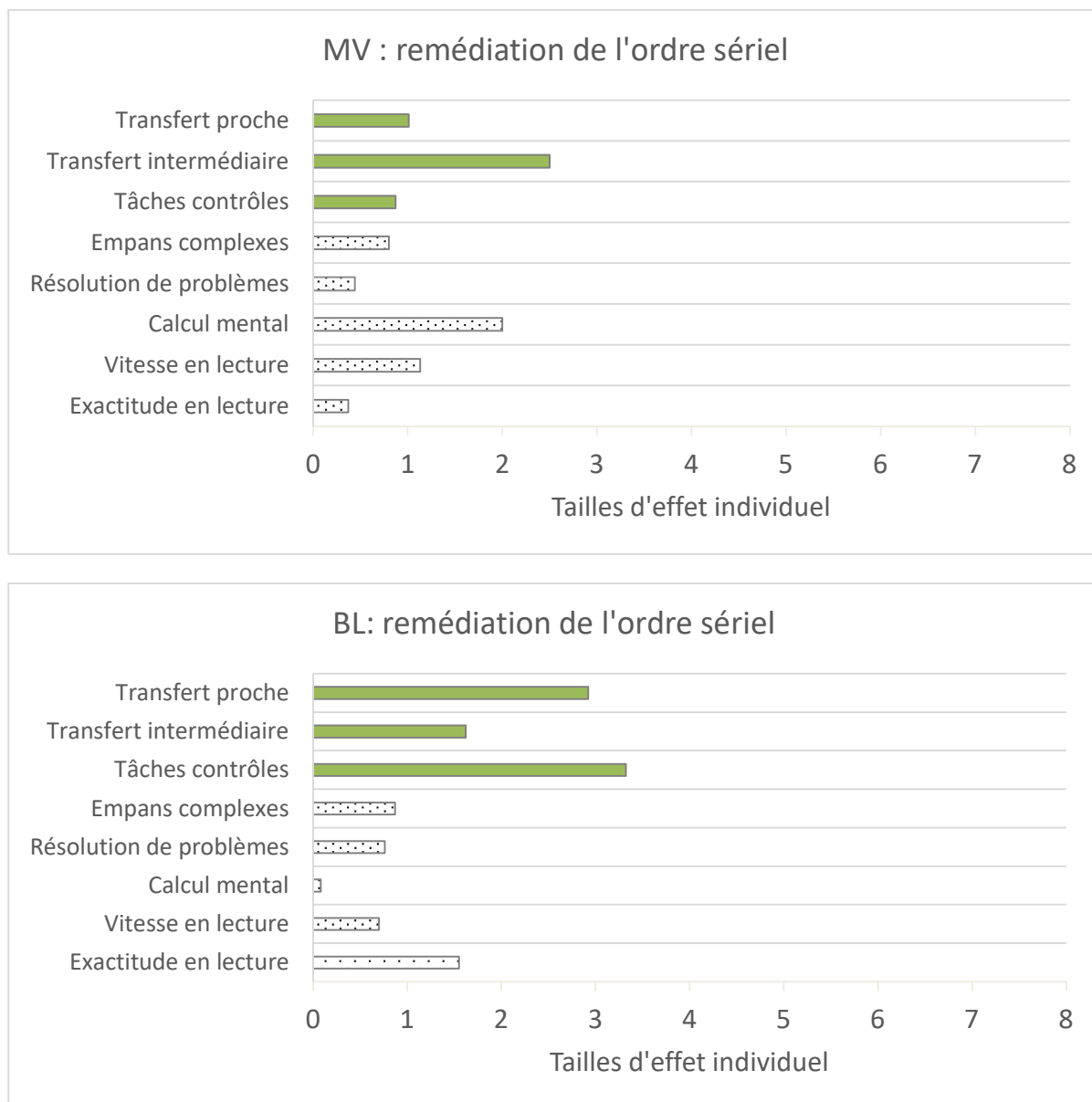
La **figure 4** représente les z-scores composites obtenus par les participants en MT de l'ordre sériel lors de l'évaluation initiale et de celle réalisée après la remédiation. Concernant MV, une amélioration du z-score composite de MT de l'ordre sériel est observée après l'intervention, bien que ce dernier reste proche de -1. La **Figure 5** montre une taille d'effet de 1,01 pour le transfert proche, de 2,5 pour le transfert intermédiaire et de 0,8 pour la tâche d'empans complexes, contre 0,87 pour la tâche contrôle. En ce qui concerne la lecture, la taille d'effet individuel est de 0,37 pour l'exactitude et de 1,13 pour la vitesse. Par ailleurs, la tâche de calcul mental montre une taille d'effet de 2 tandis qu'elle est de 0,44 pour la tâche de résolution de problèmes.

**Figure 4.** Z-scores composite de MT de l'ordre sériel pré-intervention et post-intervention des 4 adolescents.



Concernant BL, le z-score composite de MT de l'ordre sériel se situe dans la norme après l'intervention (**Figure 4**). La tâche de transfert proche montre une taille d'effet de 2,93 contre 3,32 pour la tâche contrôle de répétition différée de non-mots. En revanche le z-score composite de MT de l'item reste déficitaire comme le montre la **Figure 2**.

**Figure 5.** Effet de l'entraînement pour les adolescents ayant bénéficié d'une remédiation ciblée de la MT de l'ordre sériel (tailles d'effet individuel).



*Note.* Les tâches en pointillées correspondent aux tâches de transfert distant ; transfert proche : tâche de reconstruction de chiffres ; transfert intermédiaire : tâche de rappel sériel immédiat de mots et de non-mots, tâche de reconstruction de symboles ; tâche contrôle : répétition différée de non-mots

Les tailles d'effet sont de 1,62 pour les tâches de transfert intermédiaire et de 0,87 pour la tâche d'empans complexes. Concernant la lecture, la taille d'effet est de 1,55 pour l'exactitude et de 0,7 pour la vitesse. La résolution de problèmes et le calcul mental montre des tailles d'effet de 0,76 et de 0,08. Les résultats obtenus par les deux adolescents qui ont bénéficié d'une remédiation de la MT de l'item montrent une augmentation des z-scores de MT de l'ordre sériel qui se situent entre 0 et 1 après l'entraînement (**Figure 4**).

#### 4. Discussion

L'objectif de notre étude était d'explorer l'efficacité d'une remédiation ciblée de la MT de l'ordre sériel et de l'item phonologique chez des adolescents dyslexiques. Les deux adolescents qui ont bénéficié d'un entraînement de la MT de l'item obtiennent des z-scores composites de MT de l'item qui ne se situent plus sous le seuil pathologique après la remédiation (z-score > -1,66). Ces résultats pourraient être évocateurs d'un effet direct de la remédiation puisque le z-score composite de MT de l'item est resté déficitaire chez BL après un entraînement qui ciblait la MT de l'ordre sériel. Cela suggère que les effets d'apprentissage liés aux multiples lignes de bases administrée n'ont pas permis à BL de normaliser ses performances sur ces mesures et n'expliquent probablement pas à eux seuls l'amélioration des z-scores de RB et AF. Cependant, nous avons observé des résultats contrastés entre RB et AF concernant les tailles d'effet individuel et le transfert à d'autres tâches moins similaires aux activités proposées durant l'entraînement, suggérant que les effets de la remédiation ont pu être sous-tendus pour chacun de ces adolescents par des mécanismes distincts. En ce qui concerne RB, nous observons que la majorité des tailles d'effet sur les tâches de transfert proche, de transfert intermédiaire et de transfert distant sont supérieures à la taille d'effet des tâches contrôles (notamment pour l'exactitude et la vitesse en lecture). Les résultats de AF diffèrent puisque seules les tailles d'effet des tâches de RSI, de résolution de problèmes et d'empans complexes sont supérieures à la taille d'effet des tâches contrôles. Ainsi, les effets pourraient être contrastés selon les profils des adolescents : avec pour RB, une augmentation de la MT de l'item et un effet sur des capacités non entraînées, et pour AF le développement de nouvelles stratégies pour optimiser ses performances sur certaines tâches nécessitant un stockage temporaire de l'information verbale. En effet, une partie de nos résultats suggère



qu'AF a pu développer une stratégie de RA. Nous observons que les tâches d'empans complexes et de RSI montrent des tailles d'effets nettement supérieures aux tâches contrôles, tandis que la tâche de répétition différée de non-mots obtient une taille d'effet inférieure. Ces résultats pourraient sembler surprenant, car la tâche de répétition de non-mots est davantage similaire aux exercices proposés lors de l'entraînement de la MT de l'item. En revanche, elle se distingue des épreuves d'empans complexes et du RSI, en partie car elle ne permet pas d'utiliser une stratégie de RA en raison de la tâche interférente. Les performances en répétition différée de non-mots reposeraient donc davantage sur l'activation des représentations phonologiques en MT et beaucoup moins sur l'utilisation d'une stratégie de RA. Une hypothèse complémentaire concernant l'interprétation des résultats divergents pourrait concerner les déficits de contrôle attentionnel pouvant être associés aux déficits de MT de l'item. A la différence de RB, AF présentait un déficit sur la tâche d'empan de chiffres envers impliquant davantage les capacités de contrôle attentionnel. Le contrôle attentionnel est souvent considéré comme étant impliqué dans le stockage en MT d'informations (Cowan, 1999). Ainsi, il est possible que des déficits du contrôle attentionnel puissent limiter les effets d'un entraînement de la MT de l'item phonologique. Peut-être que ce type de déficit du contrôle attentionnel devrait faire l'objet d'une intervention spécifique avant de proposer une remédiation centrée sur la MT de l'item.

Les deux adolescents qui ont bénéficié d'un entraînement de la MT de l'ordre sériel montrent des z-scores composites de MT de l'item qui ne se situent plus sous le seuil pathologique après la remédiation (z-score > -1,66). Concernant MV, même s'il y a une amélioration du z-score de MT de l'ordre sériel, les tailles d'effet sont très limitées sur les tâches de transfert proche et de transfert distant par rapport à la tâche contrôle. Il semble ainsi peu probable que l'évolution favorable du z-score composite de MT de l'ordre sériel de MV résulte d'une réelle augmentation de ses capacités de MT. Cette évolution pourrait être davantage liée à des effets d'apprentissage de routines cognitives et de stratégies pour réussir certaines tâches. Pour Gathercole et al. (2019), deux aspects de la MT verbale peuvent nécessiter le développement de routines cognitives et par conséquent, le transfert vers d'autres tâches de MT verbale. Le premier aspect correspond à la répétition subvocale chez les enfants qui ne maîtrisent pas suffisamment ce procédé et le second est le développement de nouvelles stratégies mnémoniques. Ces routines et ces stratégies peuvent être appliquées

à d'autres tâches avec des structures communes afin d'observer un effet de transfert. Les tailles d'effet observées chez MV sont plus larges sur les tâches de transfert intermédiaire que sur la tâche de transfert proche. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la stratégie de codage spatiale de l'information sérielle proposée durant l'entraînement était surtout transférable à des éléments à mémoriser comportant maximum 6 items au regard de la grille visuo-spatiale proposée (6 images maximum). En effet, dans la tâche de transfert proche (reconstruction d'ordre sériel de chiffres), il était demandé de mémoriser jusqu'à 7 chiffres tandis que dans les tâches de RSI, les adolescents devaient mémoriser 5 items maximum rendant ainsi plus facile l'utilisation de la grille visuo-spatiale en imagerie mentale. La taille d'effet observée sur la tâche de calcul mental pourrait également être associée au développement de stratégies de maintien de l'ordre sériel puisqu'il s'agissait d'opérations comportant deux nombres. Il semble par ailleurs cohérent que les tailles d'effet observées sur la tâche de lecture soient très proches de celle observée sur la tâche contrôle puisque la stratégie de codage spatial de l'information sérielle n'est pas applicable dans ce contexte. En ce qui concerne BL, des tailles d'effet proche de 3 ont été observées pour la tâche de transfert proche et la tâche contrôle. En revanche, son z-score composite de MT de l'ordre sériel n'est plus déficitaire contrairement au z-score composite de MT de l'item qui reste inférieure à -1,66. La taille d'effet de la tâche contrôle pourrait surtout être associée à une très faible variabilité entre la LB1 et la LB2. Même si notre remédiation était basée sur l'apprentissage de stratégie de codage spatial de l'information sérielle, nous utilisons des exercices répétitifs impliquant un entraînement direct (drill) de la MT de l'ordre sériel. L'enjeu serait donc de pouvoir déterminer si l'évolution du z-score composite de MT de l'ordre sériel relèvent d'une réelle augmentation des capacités de MT de BL ou d'une certaine compensation de son déficit grâce à l'acquisition de la stratégie de codage spatial. Le fait que le z-score composite de MT de l'ordre sériel se situe dans les normes après la remédiation alors qu'il est composé des tâches de reconstruction d'ordre sériel de chiffres et de symboles qui permettent d'utiliser la stratégie de codage spatial uniquement pour les listes comportant jusqu'à 6 items pourrait être compatible avec une réelle augmentation des capacités de MT. En revanche, d'autres éléments nous incitent à considérer avec parcimonie ces résultats. Premièrement, nous observons également une augmentation considérable du z-score composite de MT de l'ordre sériel chez les deux adolescents qui avait participé à l'autre entraînement ciblant la MT de l'item, ce qui est évocateur d'un certain effet d'apprentissage à la suite des 5 administrations des tâches de MT

de l'ordre sériel. Deuxièmement, le transfert distant sur les apprentissages semble limité. Troisièmement, nous n'avons pas étudié le maintien à long terme des effets de la remédiation en proposant une autre ligne de base plusieurs mois après l'entraînement.

Ainsi, nos résultats sont hétérogènes concernant les potentiels effets d'une remédiation ciblée de la MT de l'item et de l'ordre sériel. Certaines données suggèrent une augmentation des capacités de MT de l'item pour un adolescent. En revanche les progrès observés chez les autres participants pourraient refléter davantage le développement de stratégies de compensation. D'autres études sont nécessaires afin d'investiguer les effets à long terme de ce type de remédiation ciblée ainsi que les différents facteurs associés à une amélioration des capacités de MT et au transfert sur les apprentissages.



# DISCUSSION GENERALE

## 1. Synthèse des résultats

Compte tenu des multiples déterminants des capacités de MT, le premier objectif de cette thèse était de préciser la nature des troubles de MT des enfants dyslexiques ainsi que leurs interactions avec les processus attentionnels et certaines habiletés phonologiques. L'enjeu était notamment de déterminer s'il existait des profils distincts de déficits de MT dans la dyslexie pouvant être ciblés par des stratégies de remédiation spécifiques. Afin d'étudier la pertinence d'une remédiation ciblée de la MT dans la dyslexie, il s'agissait également de spécifier si les déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel constituaient des troubles spécifiques ou s'ils s'expliquaient par des facteurs phonologiques et/ou attentionnels.

**L'étude 1** incluait des analyses de groupes et de profils individuels afin de déterminer s'il existait des dissociations et/ou des associations entre les difficultés phonologiques, les déficits de MT de l'item et les troubles de MT de l'ordre sériel chez les enfants dyslexiques. Les capacités de MT ont été mesurées avec des tâches qui permettent de distinguer le maintien de l'ordre sériel et le maintien de l'item. La conscience phonologique et la discrimination phonémique ont également été évaluées. Nos résultats ont montré que notre groupe d'enfants dyslexiques présentaient des déficits sur les tâches de MT de l'item, de MT de l'ordre sériel, de discrimination phonémique et de conscience phonologique. Nos données indiquaient également que le déficit de MT de l'item du groupe d'enfants dyslexiques n'était pas simplement la conséquence de leurs troubles phonologiques. L'étude des profils individuels, a montré une hétérogénéité des déficits de MT, avec une dissociation entre les déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel. Nos résultats ont mis globalement en évidence deux sous-groupes d'enfants dyslexiques : un sous-groupe présentant des déficits de MT de l'item associés à des troubles phonologiques et un autre sous-groupe présentant des déficits plus sélectifs de la MT de l'ordre sériel.

**L'étude 2** a été menée afin de déterminer si notre groupe d'enfants dyslexiques présentaient des déficits attentionnels spécifiques pouvant expliquer leurs troubles phonologiques, de MT de l'item et de MT de l'ordre sériel. Des tâches d'empan VA et

d'empans complexes ont été utilisées afin de compléter les mesures d'habiletés phonologiques, de MT de l'item et de l'ordre sériel. Nos résultats ont montré un déficit d'empan VA et de gestion de la charge de MT au sein du groupe d'enfants dyslexiques. Nos données indiquaient que ces deux déficits n'étaient pas uniquement la conséquence des troubles de la MT de l'item et de l'ordre sériel. De plus, nous avons observé que les déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel ne pouvaient pas être expliqués par des troubles du contrôle attentionnel. A l'inverse, les difficultés de contrôle attentionnel n'étaient pas la conséquence des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel.

Le second objectif de la thèse était d'explorer la potentielle efficacité d'une remédiation ciblée de la MT de l'ordre sériel et de l'item dans la dyslexie. **L'étude 3** a été conçue en utilisant une méthodologie d'étude de cas multiples auprès de quatre adolescents dyslexiques, afin de tester deux procédures de remédiation distinctes ciblant d'une part la MT de l'ordre sériel et d'autre part la MT de l'item. L'enjeu était de déterminer si ces remédiations ciblées pouvaient constituer des pistes thérapeutiques à investiguer davantage à plus grande échelle. Chez les adolescents ayant participé à la remédiation de la MT de l'item, nos résultats ont montré que les z-scores composites de MT de l'item se situaient dans la norme après l'entraînement. Chez ces deux participants, nous avons observé une amélioration des performances après la remédiation de la MT de l'item sur les tâches de transfert proche et de transfert intermédiaire. Une amélioration de la vitesse et de l'exactitude en lecture a été observée uniquement pour un des deux participants. Concernant les deux adolescents qui ont bénéficié d'une remédiation de la MT de l'ordre sériel, nos données ont montré une normalisation des z-scores composites de MT de l'ordre sériel. Une augmentation des performances sur la tâche de transfert proche a été observée chez les deux adolescents. En revanche, nous avons observé une amélioration des performances sur les tâches de transfert intermédiaire par rapport à la tâche contrôle uniquement chez un des deux participants. L'augmentation des performances sur les tâches de transfert distant était inférieure à celle observée sur la tâche contrôle pour un des deux adolescents.

## **2. Fonctionnement de la MT dans la dyslexie : nature et spécificité des déficits**

### **2.1 Nature des déficits de MT**

Dans l'étude 1, les résultats ont montré que notre groupe d'enfants dyslexiques présentait significativement de moins bonnes performances que les enfants normo-lecteurs sur l'ensemble des tâches de MT de l'item et de MT de l'ordre sériel. Nos données sont en accord avec les études précédentes qui ont montré des déficits de MT de l'item et de MT de l'ordre sériel dans des groupes d'enfants et d'adultes dyslexiques (Cowan et al., 2017; Hachmann et al., 2014; Martinez Perez et al., 2015; Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012). En revanche, nos résultats ne sont pas en accord avec les résultats obtenus par Wang et al. (2016) montrant une préservation des capacités de MT de l'item et de l'ordre sériel chez des adultes dyslexiques. Les résultats de Wang et al. (2016) pourraient refléter l'association entre les capacités de MT et la réussite scolaire (Alloway & Alloway, 2010), puisque leur étude incluait exclusivement des adultes dyslexiques étudiant à l'université, suggérant ainsi un éventuel biais de recrutement (l'étude concernait uniquement les adultes dyslexiques dont les résultats scolaires leur avaient permis d'accéder à l'université).

Les données issues de l'étude 1 corroborent des résultats antérieures concernant l'indépendance entre le déficit de MT de l'item et le trouble de MT de l'ordre sériel dans la dyslexie (Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012; Martinez Perez et al., 2015). D'une part, le déficit de MT de l'ordre sériel persistait dans notre groupe d'enfants dyslexiques lorsque leurs capacités de MT de l'item étaient contrôlées. D'autre part, le déficit de MT de l'item des participants dyslexiques est resté significatif en contrôlant les capacités de MT de l'ordre sériel. Nos résultats vont dans le sens des différents travaux qui ont observé un déficit de MT de l'ordre sériel chez des personnes dyslexiques (Cowan et al., 2017; Hachmann et al., 2014, 2020; Martinez Perez et al., 2013, 2015; Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012; Nithart et al., 2009). Nos analyses de groupe contrastent avec l'étude de Staels et Van den Broeck (2014) qui n'avait pas montré de résultats en faveur de l'indépendance des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel chez des enfants dyslexiques. Au-delà de l'indépendance entre MT de l'item et MT de l'ordre sériel, nos études de profils individuels ont permis de mettre en évidence une dissociation entre ces deux aspects de la MT au sein même de la population

d'enfants dyslexiques. En effet, certains enfants présentent un déficit sur la MT de l'item, d'autres montrent un déficit en MT de l'ordre sériel, tandis que d'autres enfants ont des déficits sur les deux composantes de MT. Ces éléments seront discutés de manière plus approfondie dans la section « hétérogénéité et dissociation des déficits de MT ».

### **Le déficit de MT de l'ordre sériel**

Nous avons montré que le groupe d'enfants dyslexiques présentaient des performances inférieures au groupe contrôle sur une tâche non verbale de MT de l'ordre sériel (étude 1). Ces résultats sont en accord avec les études antérieures qui soutiennent que le trouble de MT de l'ordre sériel dans la dyslexie n'est pas uniquement la conséquence de difficultés de maintien d'éléments verbaux en MT (Hachmann et al., 2014; Martinez Perez et al., 2015). Par ailleurs, le déficit de MT de l'ordre sériel de notre groupe d'enfants dyslexiques a été observé indépendamment de leurs troubles attentionnels (étude 2). Nos données vont donc à l'encontre de l'hypothèse proposant que les déficits de MT de l'ordre sériel des personnes dyslexiques soient la conséquence de leurs difficultés attentionnelles (Cowan et al., 2017).

Toutefois, même si nos résultats montrent que les difficultés de focalisation attentionnelle n'expliquent pas le déficit de MT de l'ordre sériel observé chez nos participants dyslexiques, nous ne pouvons pas exclure l'implication de difficultés d'attention spatiale. En effet, certaines données de la littérature suggèrent que les personnes dyslexiques présentent des difficultés pour coder spatialement l'information en MT. Jones et al. (2013) ont montré qu'en comparaison à un groupe contrôle, des adultes dyslexiques n'utilisaient pas efficacement la position des stimuli comme indice de récupération en MT lors de l'apprentissage d'association visuelles et phonologiques. Des résultats similaires ont été répliqués chez des enfants dyslexiques. Toffalini et al. (2018) ont ainsi montré que contrairement à des enfants au développement typique, les enfants dyslexiques n'étaient pas en mesure d'utiliser des indices spatiaux afin de faciliter l'association de stimuli visuels et phonologiques en MT.

Ces difficultés pourraient s'expliquer par des troubles de l'attention spatiale qui ont déjà été mis en évidence chez des enfants dyslexiques et qui constituaient un prédicteur important de leurs capacités de décodage de non-mots (Facoetti et al., 2010). Plus



précisément, les enfants dyslexiques qui présentaient des difficultés de décodage de non-mots ont montré des temps de réaction plus lents à des stimuli visuels et auditifs dans des tâches de détection de cibles impliquant des indices spatiaux. Les auteurs proposaient ainsi que ce ralentissement du déplacement de l'attention dans la dyslexie soit lié à un dysfonctionnement temporo-pariétal. D'autres chercheurs ont mis en évidence un biais attentionnel vers la droite dans la dyslexie soutenant ainsi l'hypothèse d'une distribution asymétrique de l'attention spatiale en faveur de l'espace droit dans la dyslexie (Michel et al., 2011; Waldie & Hausmann, 2010). Les difficultés de codage spatial de l'information en MT dans la dyslexie pourraient également être sous-tendues par des difficultés de représentation de l'espace. Vieira et al. (2013) ont étudié la représentation de l'espace chez des enfants dyslexiques. Dans une tâche de bissection de ligne le traitement du contexte spatial était asymétriquement plus efficace dans l'espace gauche chez enfants dyslexiques tandis qu'il était symétrique dans le groupe contrôle. Comme des troubles d'attention spatiale et des difficultés de représentation de l'espace ont déjà été observés dans la dyslexie, des études supplémentaires pourraient être menées afin d'étudier davantage les relations entre déficit de MT de l'ordre sériel et difficultés spatiales.

Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont proposé que la dyslexie soit sous-tendue par un déficit général d'apprentissage implicite de séquences (Jiménez-Fernández et al., 2011; Lum et al., 2013; Vicari, 2005). Selon cette hypothèse, un déficit dans l'apprentissage implicite de séquences pourrait avoir un impact négatif sur l'acquisition des compétences en lecture car la lecture implique des processus d'apprentissage implicite et séquentiel. Dans une méta-analyse, Lum et al. (2013) ont observé que les personnes présentant une dyslexie montraient des difficultés significatives dans les tâches d'apprentissage implicite de séquences. Peter, Albert, Panagiotides, et al. (2021) ont par ailleurs étudié les capacités de traitement séquentiel des adultes dyslexiques en utilisant une tâche de comparaison de mots qui différaient concernant l'ordre de la séquence de lettres (e.g two-tow). Leurs résultats ont montré que les participants dyslexiques présentaient des performances inférieures au groupe contrôle. Il a par ailleurs été observé que des adultes dyslexiques produisaient plus d'erreurs séquentielles qu'un groupe contrôle dans une tâche d'épellation de mots (Peter, Albert, & Gray, 2021). Ainsi, bien que certains chercheurs considèrent que l'apprentissage implicite de séquences impliquent directement la MT de l'ordre sériel (Bogaerts, Szmalec, Hachmann, Page, & Duyck,

2015), nous pouvons nous demander si le déficit de MT de l'ordre sériel observé au sein de notre groupe d'enfants dyslexiques s'inscrit dans un trouble plus général d'apprentissage séquentiel.

### **Le déficit de MT de l'item**

Concernant la MT de l'item, nous avons observé que ce déficit de MT restait significatif chez nos participants dyslexiques lorsque leurs capacités de conscience phonologique et de discrimination phonémique étaient contrôlées. Ces résultats pourraient simplement refléter une différence concernant la charge de MT dans nos tâches. En effet, notre tâche de rappel sériel immédiat comportait une charge de MT supérieure à celle de nos tâches phonologiques puisqu'il s'agissait de maintenir en MT jusqu'à 5 non-mots. Cependant, plusieurs données issues de nos deux premières études ne sont pas compatibles avec cette interprétation. D'une part, notre groupe d'enfants dyslexiques présentaient des difficultés de conscience phonologique et de MT de l'item qui étaient indépendantes de leur sensibilité accrue à la charge de MT (étude 2). D'autre part, les déficits de nos participants dyslexiques dans la tâche de conscience phonologique et de discrimination phonémique n'étaient plus significatifs après le contrôle de leurs capacités de MT de l'item (étude 1). La tâche de suppression de phonèmes est généralement considérée comme un prédicteur important de la dyslexie (Landerl et al., 2013; Vellutino et al., 2004). Cette tâche de conscience phonologique est censée évaluer les compétences phonologiques, notamment car elle implique le maintien en MT de l'information phonologique et son traitement explicite afin de supprimer le phonème initial. Dans la dyslexie, le déficit de MT de l'item a souvent été étudié dans le cadre de la théorie phonologique, qui considère que ce trouble est surtout la conséquence de leurs difficultés phonologiques (Alegria, 2004). Nos résultats ne sont pas en accord avec cette hypothèse et suggèrent plutôt que le déficit de MT de l'item des enfants dyslexiques pourrait être indépendants de leurs troubles phonologiques. Nos données sont davantage en accord avec les travaux de Sela et al. (2012) qui proposaient que les difficultés des personnes dyslexiques dans les tâches phonologiques soient consécutives à leurs déficits de MT.

Dans l'étude 2, le déficit de MT de l'item au sein de notre groupe d'enfants dyslexiques a été observé indépendamment de leurs difficultés attentionnelles. De plus, nos résultats n'ont pas montré de différence significative entre les enfants dyslexiques et les enfants au

développement typique sur la tâche de répétition de mots et de non-mots isolés (étude 2), soulignant ainsi une préservation des représentations phonologiques stockées en MLT chez nos participants dyslexiques, comme cela a déjà été observée (Ramus & Ahissar, 2012; Soroli et al., 2010). Certains modèles théoriques considèrent que la MT de l'item est un système intégré dans la MLT qui reflète simplement l'activation d'une partie spécifique de la MLT (Cowan, 1999; Oberauer, 2002). Au regard de ces modélisations théoriques, le déficit de MT de l'item dans la dyslexie pourrait être sous-tendu par un dysfonctionnement concernant soit les processus attentionnels soit les représentations phonologiques stockées en MLT. Nos résultats ne sont pas en accord avec l'hypothèse d'un déficit de MT de l'item uniquement consécutif à des troubles attentionnels. Nos données vont également à l'encontre d'un déficit de MT de l'item causé exclusivement par un trouble des représentations phonologiques stockée en MLT, puisque nous n'avons pas observé de difficultés dans des tâches langagières plus élémentaires telle que la répétition d'un seul non-mot.

Ainsi, les données issues de nos deux premières études suggèrent l'existence d'un déficit spécifique de MT de l'item dans la dyslexie, qui ne serait pas uniquement consécutif à des troubles attentionnels ou à des difficultés phonologiques. Cette hypothèse est compatible avec certaines approches de la MT qui considèrent qu'il existe un système spécifique dédié au maintien des informations verbales en MT (Baddeley & Hitch, 2019; Camos & Barrouillet, 2014a). Ces modèles de la MT ont proposé que le maintien de l'information verbale en MT soit en partie sous-tendu par un mécanisme de récapitulation articulatoire. Toutefois, le déficit observé chez nos participants dyslexiques sur la tâche de répétition différée de non-mot est peu compatible avec l'hypothèse d'un trouble de MT de l'item s'expliquant uniquement par des difficultés dans le processus de récapitulation articulatoire (étude 1). En effet, la tâche verbale interférente proposée après la présentation de chaque non-mot limitait les processus de récapitulation articulatoire mises en place par les enfants. Ainsi, si le déficit de MT de l'item était en lien avec un dysfonctionnement des mécanismes de récapitulation articulatoire, les faibles performances des enfants dyslexiques auraient été observées uniquement sur la tâche de rappel sériel immédiat. Kibby (2009) considère que les déficits de MT dans la dyslexie sont sous-tendus par plusieurs facteurs et notamment par une perturbation du stockage phonologique en MT. Nos données semblent davantage

compatibles avec cette hypothèse et suggèrent l'existence d'un déficit spécifique du maintien des représentations phonologiques en MT dans la dyslexie.

### **Hétérogénéité et dissociation des déficits de MT**

Même si nos études de groupes ont montré des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel chez nos participants dyslexiques, nos analyses de profils individuels ont montré une certaine hétérogénéité de ces déficits de MT. En effet, 52% des participants dyslexiques présentaient des difficultés sur au moins une des composantes de MT de l'item et de l'ordre sériel.

Au-delà d'une hétérogénéité des déficits de MT, nos analyses de profils individuels ont montré l'existence de trois profils distincts de déficits de MT dans notre groupe d'enfants dyslexiques (étude 1). Le premier profil correspondait aux enfants dyslexiques qui présentaient un double déficit à la fois en MT de l'item et en MT de l'ordre sériel (23% des participants avec un trouble de MT). Même si cela représente un profil minoritaire au sein de notre groupe d'enfants dyslexiques avec un déficit de MT, ces données ne sont pas totalement en contradiction avec les résultats de Staels et Van den Broeck (2014), qui ont montré une association entre les troubles de la MT de l'item et de l'ordre sériel chez des enfants dyslexiques. D'une part, ce profil de double déficit pourrait refléter l'implication de troubles cognitifs plus généraux impliquant notamment les processus attentionnels et/ou exécutifs. D'autre part, ce profil pourrait être compatible avec l'hypothèse *SOLID (Serial Order Learning Impairment in Dyslexia)*, qui propose que les dysfonctionnements linguistiques et non linguistiques chez certaines personnes dyslexiques reflètent un déficit central de l'apprentissage sériel d'informations (Bogaerts, Szmalec, Hachmann, Page, & Duyck, 2015; Szmalec et al., 2011). Dans cette perspective, le déficit d'apprentissage sériel perturberait le développement des représentations phonologiques stockées en MLT limitant ainsi les performances sur les tâches de MT de l'item. Ce déficit central d'apprentissage sériel s'observerait également à travers les tâches de MT de l'ordre sériel.

Le second profil d'enfants dyslexiques était caractérisé par un déficit de MT de l'item fréquemment accompagné de déficits de conscience phonologique et/ou de discrimination phonémique. Il correspondait aux enfants dyslexiques qui présentaient un déficit sélectif de MT de l'item sans déficit de MT de l'ordre sériel (33% des participants dyslexiques avec un

trouble de MT). De plus, 75% des enfants avec ce profil montraient des difficultés significatives sur au moins une des tâches phonologiques (discrimination phonémique, conscience phonologique).

Le troisième profil d'enfants dyslexiques était associé à un déficit de MT de l'ordre sériel avec des troubles phonologiques moins fréquemment concomitants. Ce profil correspondait aux enfants dyslexiques qui présentaient un déficit sélectif de MT de l'ordre sériel sans déficit de MT de l'item (46% des participants dyslexiques avec un trouble de MT). Dans ce profil, 33% des enfants présentaient un déficit concernant au moins une des mesures phonologiques.

Nos données soutiennent la distinction entre des dyslexies sous-tendues par un trouble langagier primaire et des dyslexies avec des capacités langagières préservées (Cowan et al., 2017). Nos résultats renforcent également les théories qui distinguent la MT de l'item et de l'ordre sériel, puisqu'ils corroborent les données neuropsychologiques ayant déjà montré une dissociation entre ces deux déficits de MT dans des troubles neurologiques et neurodéveloppementaux (Majerus, Attout, Artielle, & Van Der Kaa, 2015; Majerus et al., 2007; Schraeyen, Van Der Elst, et al., 2019). Par ailleurs, nos données vont à l'encontre des théories unitaires qui considèrent que la dyslexie est sous-tendue par un déficit unique (Wolff & Bowers, 1999). Nos résultats sont davantage en accord avec l'hypothèse selon laquelle la dyslexie peut être sous-tendue par de multiples déficits pouvant s'observer de manière concomitante ou indépendante (Pennington, 2012).

En accord avec les études montrant une implication indépendante de la MT de l'ordre sériel dans l'apprentissage de la lecture (Binamé & Poncelet, 2016; Martinez Perez, Majerus, & Poncelet, 2012), nos résultats peuvent soutenir l'hypothèse d'un trouble spécifique et central de MT de l'ordre sériel dans un certain type de dyslexies (Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012; Martinez Perez et al., 2013). En effet, nos données ont montré que plusieurs enfants dyslexiques présentaient un déficit de MT de l'ordre sériel indépendamment de difficultés attentionnelles et sans trouble de conscience phonologique, de discrimination phonologique ou de MT de l'item.

Toutefois, il est possible que le langage écrit et la MT de l'ordre sériel entretiennent des relations bidirectionnelles. Les premières activités de décodage pourraient soutenir le développement de la répétition subvocale, et par conséquent, améliorer les performances de MT de l'ordre sériel (Demoulin & Kolinsky, 2016). Smalle et al. (2019) ont par ailleurs montré

que des adultes alphabétisées présentaient de meilleures performances que des adultes illettrés sur une tâche du paradigme de Hebb évaluant la MT de l'ordre sériel en modalité verbale. Nous pouvons donc nous demander si les difficultés d'apprentissage du langage écrit des participants de nos études ont pu limiter le développement de leurs capacités de MT de l'ordre sériel. Si la relation bidirectionnelle entre MT de l'ordre sériel et le langage écrit semble davantage concerner la modalité verbale de la MT, nos résultats montrent que les enfants dyslexiques présentent aussi un déficit sur une tâche de MT de l'ordre sériel non verbale (étude 1). Ces données suggèrent que leur trouble de la MT de l'ordre sériel pourrait ne pas être simplement la conséquence de leurs difficultés de lecture. Toutefois, le manque d'efficacité de la remédiation de la MT de l'ordre sériel pour un des adolescents (étude 3) pourrait également s'expliquer par des difficultés de MT de l'ordre sériel consécutives à des troubles du langage écrit. Il a été proposé que lorsqu'un individu doit maintenir en MT une séquence arbitraire de nouveaux éléments, il les organise mentalement de gauche à droite dans un espace interne, de manière à ce que l'attention spatiale contrôle la recherche et la récupération en MT (Abrahamse et al., 2014). Des données suggèrent que cette spatialisation de l'information en MT est modulée par des aspects culturels, notamment en lien avec l'alphabétisation et le sens de la lecture et de l'écriture (Guida et al., 2018). Il a ainsi été observé que des lecteurs belges et français organisaient mentalement les séquences en MT de gauche à droite, que des lecteurs égyptiens arabophones utilisaient spontanément la direction opposée et que des illettrés arabophones ne montraient aucune organisation spatiale systématique. Si les mécanismes de spatialisation sont modulés par l'alphabétisation, il est possible que le manque de maîtrise du langage écrit limite la mise en place de ce processus de spatialisation qui s'effectue à partir du CE2 (Guida et al., 2020). Ainsi, certains enfants dyslexiques pourraient présenter des déficits de MT de l'ordre sériel davantage consécutifs à des difficultés de spatialisation en raison de leurs troubles de la lecture. Même si le déficit de MT de l'ordre sériel a déjà été observé chez des enfants dyslexiques, par rapport à d'autres enfants appariés en âge de lecture (Martinez Perez, Majerus, Mahot, et al., 2012; Nithart et al., 2009), l'absence de groupe contrôle apparié en âge de lecture constitue une limite de ce travail de thèse.

De plus, nous n'avons pas évalué l'ensemble des compétences phonologiques telle que la dénomination rapide qui implique la récupération rapide en MLT de la forme orale d'un mot

à partir de sa représentation imagée. Pourtant, certaines études ont montré des déficits de dénomination rapide dans la dyslexie (De Groot et al., 2015; Mundy & Hannant, 2020) et que cette capacité était corrélée à l'apprentissage de la lecture (Clarke et al., 2005; Georgiou et al., 2008). Il a été observé que la MT de l'ordre sériel était corrélée aux capacités de vocabulaire réceptif mais également aux capacités de dénomination d'images simples chez des jeunes enfants (Attout et al., 2020). Des études supplémentaires pourraient donc être menées afin de préciser les interactions entre les déficits de MT de l'ordre sériel des personnes dyslexiques dans leurs difficultés en dénomination rapide.

## **2.2 Troubles attentionnels et lien avec la MT**

Nos données ont montré que les troubles attentionnels au sein de notre groupe d'enfants dyslexiques concernaient surtout la focalisation de l'attention (étude 2). Nos participants dyslexiques présentaient une sensibilité accrue à la charge mnésique et un trouble de l'empan VA indépendamment de leurs capacités de MT de l'item et de l'ordre sériel. D'une part, lorsque le nombre de stimuli à maintenir en MT verbale augmentait, les ressources attentionnelles des enfants dyslexiques étaient moins disponibles pour une tâche de traitement simultané en comparaison à des enfants normo-lecteurs. D'autre part, la quantité de stimuli visuels distincts pouvant être traités simultanément était réduite chez nos participants dyslexiques en comparaison au groupe contrôle. Nos résultats sont en accord avec les travaux qui ont déjà observé une sensibilité accrue à la charge de MT chez des personnes dyslexiques, en utilisant des tâches impliquant des non-mots (Soroli et al., 2010). Certains auteurs ont proposé que cette sensibilité accrue à la charge de MT soit secondaire aux faibles représentations phonologiques des personnes dyslexiques ou bien consécutives à leurs déficits de MT de l'item (Alegria, 2004; Moura et al., 2015). Nos données ne soutiennent pas ces hypothèses puisque cette sensibilité spécifique à la charge de MT dans notre groupe d'enfants dyslexiques s'observait indépendamment de leurs capacités de maintien d'éléments phonologiques en MT. A l'inverse, le déficit de discrimination phonémique des enfants avec une dyslexie apparaissait comme étant la conséquence de leurs difficultés attentionnelles. Nos résultats sont davantage en accord avec l'hypothèse d'un trouble spécifique de focalisation de l'attention chez certains enfants dyslexiques. Des chercheurs ont déjà mis en évidence un type de dyslexie caractérisé par un déficit de l'empan VA sans trouble

phonologique (Peyrin et al., 2012; Zoubrinetzky et al., 2014). Il a ainsi été proposé que ce profil de dyslexie soit sous-tendu par un déficit central de l’empan VA. Afin d’explorer cette hypothèse, des analyses complémentaires de nos données pourraient être menées pour déterminer si ces difficultés de focalisation de l’attention peuvent s’observer sans déficit de MT de l’item ou de l’ordre sériel chez les enfants dyslexiques.

Concernant le contrôle attentionnel en MT, nos données suggèrent une préservation de ce mécanisme chez les enfants avec une dyslexie (étude 2). Même si le groupe d’enfants dyslexiques présentent de plus faibles performances que le groupe d’enfants au développement typique sur les tâches de contrôle attentionnel, ces difficultés sont consécutives à leurs déficits de MT de l’item et de l’ordre sériel. Autrement dit, les troubles de la MT de l’item et de l’ordre sériel des enfants dyslexiques entraînent une sensibilité accrue à la charge cognitive et des difficultés pour stocker et traiter simultanément des informations en MT. Ainsi, les enfants dyslexiques ne présentent pas de déficit spécifique de contrôle attentionnel en MT renvoyant à des aspects plus exécutifs de l’attention pour contrôler l’exécution de la tâche et mettre en œuvre des stratégies permettant de sélectionner, encoder et maintenir les stimuli en MT. Ces résultats peuvent contribuer à une meilleure compréhension de la littérature concernant l’inconsistance des déficits des personnes dyslexiques sur les tâches d’empans complexes. En effet, si les difficultés attentionnelles dans la dyslexie concernent davantage la focalisation de l’attention, il est probable que la mise en évidence de déficits spécifiques sur des tâches d’empans complexes dépende surtout des paradigmes expérimentaux utilisés. Ainsi, les tâches d’empans complexes avec une charge de MT élevée seraient plus susceptibles d’objectiver des difficultés chez les personnes dyslexiques par rapport à des tâches utilisant un paradigme impliquant plutôt une charge cognitive ou un niveau de complexité élevé.

Toutefois, nos résultats concernant l’absence de déficit de contrôle attentionnel en MT dans la dyslexie sont à nuancer au regard des autres données de la littérature. Nous n’avons pas mesuré l’ensemble des processus impliqués dans le contrôle attentionnel en MT telles que la résistance à l’interférence et plus globalement les fonctions exécutives. Pourtant, plusieurs travaux ont mis en évidence des déficits dans la dyslexie concernant ces processus spécifiques (Alt et al., 2022; Bogaerts, Szmalec, Hachmann, Page, Woumans, et al., 2015; Varvara et al., 2014).



Les résultats de l'étude 2 pourraient être évocateurs de possibles chevauchements entre le focus attentionnel décrit par Cowan (1999) et l'empan VA proposé par Bosse et al. (2007). En effet, les difficultés attentionnelles de nos participants dyslexiques concernent uniquement l'empan VA et la sensibilité accrue à la charge de MT, montrant ainsi une réduction du nombre de stimuli distincts pouvant être traités simultanément en modalité visuelle et auditive. Dans le modèle de Cowan (1999), le focus attentionnel correspond à la quantité limitée d'éléments dont un individu peut être conscient à un moment donné. L'empan VA quant à lui, se définit comme la quantité d'éléments visuels distincts traités simultanément dans une configuration (Bosse et al., 2007). Ces deux processus renvoient donc à la focalisation de l'attention sur les stimuli, conditionnée par la quantité d'éléments dont un individu peut être conscient de manière simultanée. L'empan VA est un processus qui s'intègre dans le modèle multitraces de la lecture (Ans, Carbonnel & Valdois 1998). Dans ce modèle, l'empan VA joue un rôle majeur dans l'apprentissage de la lecture et la lecture experte. Lors de la lecture d'un mot, l'empan VA est étendu sur l'ensemble des lettres afin d'activer l'ensemble des connaissances préalablement mémorisées sur ce mot au sein de la MLT. Les connaissances stockées en MLT sur ce mot permettent d'activer plusieurs formes orthographiques et phonologiques, qui sont fréquemment en compétition en raison de l'activation de mots proches concurrents. Cette compétition mène à l'activation d'un élément unique par position (une lettre/un phonème correspond à une position dans le mot). La séquence phonémique qui en résulte est ensuite maintenue en MT jusqu'à la prononciation. Dans le modèle de Cowan (1999), le focus attentionnel permet de maintenir activée une partie de la MLT en MT. Ainsi, le focus attentionnel et l'empan VA sont tous les deux modélisés en lien avec l'activation des connaissances stockées en MLT et la MT.

### **3. L'approche cognitive pour la remédiation de la MT dans la dyslexie**

L'étude 1 et 2 ont permis de préciser la nature des troubles de MT des enfants dyslexiques. Nos résultats qui ont montré une hétérogénéité de ces déficits au sein de notre groupe d'enfants dyslexiques sont peu compatibles avec l'approche fonctionnelle impliquant une stimulation globale de la MT pour la remédiation. Les données issues de nos analyses de

profils individuels soulignent que l'approche cognitive constitue une méthodologie à privilégier pour la remédiation des déficits de MT dans la dyslexie. Le second objectif de cette thèse était donc d'explorer la potentielle efficacité d'une remédiation ciblée de la MT de l'item et de l'ordre sériel chez des adolescents dyslexiques.

### **3.2 Quelle efficacité potentielle d'une remédiation ciblée de la MT chez des enfants et adolescents dyslexiques ?**

Les résultats de l'étude 3 ont montré des résultats contrastés concernant les effets d'une remédiation ciblée des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel. Concernant la remédiation de la MT de l'item un des deux adolescents semble avoir amélioré ses capacités de MT de l'item (RB) tandis que l'autre participant (AF) semble surtout avoir développé de nouvelles stratégies. En ce qui concerne RB, il a obtenu un z-score composite en MT de l'item qui se situait dans la norme après la remédiation. Les mesures spécifiques de MT de l'item s'étaient améliorées davantage que la tâche contrôle. La vitesse et l'exactitude en lecture avaient également augmenté davantage que la tâche contrôle. Nous pouvons nous demander quels sont les aspects de l'entraînement qui ont permis à RB d'améliorer ses capacités de MT. Il est peu probable que la stratégie de RA soit l'unique facteur d'augmentation des capacités de MT puisque nous avons observé une évolution des performances sur la tâche de répétition différée de non-mots dans laquelle il n'est pas possible d'utiliser cette stratégie. De plus, le transfert distant observé sur les performances en lecture suggère que les effets de la remédiation ne s'expliquent pas uniquement par l'utilisation de la stratégie de codage visuel. Même si la remédiation comportait des phases spécifiques d'entraînement à la RA et au codage visuel, nous avons probablement également entraîné le maintien d'informations phonologique, en raison de l'aspect répétitif des exercices proposés impliquant des non-mots. Il est donc possible que l'amélioration des capacités de MT de l'item chez RB résulte d'une réelle augmentation des capacités de maintien de l'information phonologique en MT. Il reste toutefois difficile d'exclure que les effets de la remédiation soient en lien avec une consolidation des représentations phonologiques stockées en MLT facilitant ainsi un meilleur maintien des informations phonologiques stockées en MT. Pourtant, la compréhension des mécanismes qui ont contribué à cette amélioration des capacités de MT constitue un enjeu important, notamment afin de savoir si la remédiation de la MT de l'item phonologique

pourrait apporter réellement des effets spécifiques par rapport aux entraînements à la conscience phonologique qui ciblent directement les représentations phonologiques stockées en MLT. Ainsi, de nouvelles investigations comparant les effets des entraînements phonologiques et ceux de la remédiation de la MT de l'item chez des enfants dyslexiques pourraient être menées afin d'étudier s'il s'agit réellement d'interventions complémentaires.

En ce qui concerne AF, nos résultats ont montré que son z-score composite de MT de l'item se situait dans la norme après la remédiation. En revanche, la tâche de répétition différée de non-mot évaluant la MT de l'item ne s'était pas davantage améliorée que la tâche contrôle. Ces résultats ne sont pas en accord avec certaines méta-analyses qui ont montré que les effets des entraînements de MT s'observaient surtout en raison du degré de similarité entre les tâches entraînées et les épreuves d'évaluation (Aksayli et al., 2019; Sala & Gobet, 2020). En effet, la tâche de répétition différée correspondait à la tâche qui était la plus similaire au matériel d'entraînement. Par ailleurs, les performances sur l'épreuve de RSI, d'empan complexe et de résolution de problèmes ont augmenté davantage que la tâche contrôle. Les données concernant AF sont compatibles avec l'hypothèse selon laquelle les effets des entraînements de MT seraient surtout consécutifs à l'acquisition de nouvelles routines cognitives (Gathercole et al., 2019). En effet, l'augmentation des performances de AF plus spécifiquement sur les tâches d'empans complexes et de RSI suggère l'utilisation d'une stratégie de RA. Nos données concernant AF corroborent des résultats antérieurs ayant montré un transfert significatif de l'entraînement de MT sur des tâches avec un paradigme de rappel sériel ou d'empan complexe (Gathercole et al., 2019).

Ces résultats contrastés entre RB et AF pourraient refléter deux profils différents de déficit de MT de l'item. Concernant RB, nos données suggèrent qu'il présentait un déficit isolé de MT de l'item sans trouble du contrôle exécutif et attentionnel (impliqué en MT), puisqu'il s'agissait de l'unique participant qui montrait des performances dans la norme sur les tâches d'empans envers du WISC-V. En ce qui concerne AF, il est possible que ses difficultés observées sur les tâches de MT de l'item relèvent davantage d'un trouble du contrôle exécutif et attentionnel en MT. En effet, un déficit était observé sur l'empan de chiffres envers du WISC-V alors que les performances se situaient dans la norme pour l'empan de chiffres droit, suggérant ainsi des difficultés en MT lorsqu'il s'agit de mobiliser des capacités de contrôle exécutif et attentionnel. Ainsi, même si les résultats de AF n'atteignaient pas le seuil de déficit

concernant la MT de l'ordre sériel, son z-score composite était de -1,48 et pouvait être évocateur de fragilités plus globales sur les tâches de MT en lien avec le contrôle attentionnel et exécutif. Si nous considérons le déficit de MT de l'item de AF comme étant sous-tendu par des difficultés de contrôle attentionnel et exécutif en MT, il est donc cohérent qu'un entraînement au maintien de l'information phonologique en MT ou à des stratégies de RA et de codage visuel n'améliore pas directement ses capacités de MT.

Ainsi nos résultats suggèrent qu'une remédiation ciblée de la MT de l'item pourrait constituer une piste thérapeutique complémentaire pour les adolescents dyslexiques. Ce type d'entraînement pourrait conduire à une amélioration des capacités de MT de l'item et des performances en lecture, plus particulièrement chez des adolescents qui présente un déficit relativement isolé de cette composante de la MT. Chez les adolescents qui présentent des troubles du contrôle attentionnel et exécutif associés à leur déficit de MT de l'item, les effets de ce type de remédiation pourraient être davantage limités au développement de nouvelles stratégies.

Concernant la remédiation de la MT de l'ordre sériel, nos résultats sont également contrastés. En ce qui concerne BL certaines données sont compatibles avec une amélioration des capacités de MT de l'ordre sériel tandis que d'autres données suggèrent plutôt des effets d'apprentissage. D'une part, nous avons observé des effets spécifiques de la remédiation. Après l'entraînement, BL a obtenu un z-score composite de MT de l'ordre sériel qui se situait dans la norme tandis que son z-score de MT de l'item était toujours dans la zone de déficit. Cependant, en raison de la très faible variabilité entre la LB1 et la LB2 sur la tâche de répétition différée de non-mots (tâche contrôle), l'amélioration des performances sur l'ensemble de nos mesures était inférieure à celle observée sur notre mesure contrôle après la remédiation. Cette très faible variabilité des performances sur la tâche de répétition différée de non-mot montre que le déficit de MT de l'item de BL était stable mais limite l'interprétation de nos résultats. Nous avons toutefois observé que la tâche de MT de l'ordre sériel (reconstruction de l'ordre sériel de chiffres) s'était davantage améliorée que les autres mesures moins spécifiques telles que la résolution de problèmes et le calcul mental. D'autre part, nos données ont montré que le transfert distant et intermédiaire semblait limité sur le RSI, les performances en lecture, la résolution de problème et le calcul mental. Cependant, BL était l'unique participant qui présentait un déficit à la fois en MT de l'item et de l'ordre sériel, il est

donc normal de constater une faible amélioration des performances sur la tâche de RSI qui implique ces deux composantes de la MT. De plus, comme la MT de l'item et de l'ordre sériel sont impliquées de manière distincte dans l'apprentissage du langage écrit (Binamé & Poncelet, 2016; Martinez Perez, Majerus, & Poncelet, 2012), il n'est pas surprenant qu'un transfert limité soit observé sur les tâches de lecture, puisque les difficultés sur ces tâches sont probablement multifactorielles. Un constat similaire peut être proposé concernant le faible transfert sur les tâches de calcul mental et de résolution de problème. En effet, les difficultés concernant les compétences arithmétiques peuvent impliquer la MT de l'ordre sériel (Attout & Majerus, 2015), mais également la gestion de l'interférence (De Visscher et al., 2015) et la représentation de la magnitude du nombre (Geary et al., 2008). Ainsi, malgré un transfert distant limité, l'hypothèse d'une potentielle amélioration de la MT de l'ordre sériel après une remédiation ciblée n'est pas totalement à exclure. Une évaluation écologique des capacités de MT avec le Q-MEM (Geurten et al., 2018) ou l'indice de MT de la BRIEF (Gioia et al., 2000; Roy et al., 2014) aurait permis d'étudier le transfert dans la vie quotidienne. Des recherches supplémentaires incluant ce type de questionnaires et des mesures réalisées plusieurs mois après les entraînements de MT permettraient d'explorer plus précisément les effets potentiels d'une remédiation de la MT de l'ordre sériel.

En ce qui concerne MV, nos résultats montrent des effets spécifiques sur les mesures de MT de l'ordre sériel. Après l'entraînement, MV a obtenu un z-score composite de MT de l'ordre sériel qui se situait dans la norme. Nous avons également observé que les mesures de transfert intermédiaire impliquant le RSI et la reconstruction de l'ordre de symboles s'amélioraient davantage que la tâche contrôle. Toutefois, l'amélioration des performances sur la tâche de transfert proche (reconstruction de l'ordre sériel de chiffres) était légèrement supérieure à la mesure contrôle. Concernant le transfert distant, il semblait limité sur les performances en lecture et la résolution de problèmes. Cependant, l'amélioration des performances en calcul mental était supérieure à celle observée sur la tâche contrôle. Ces données peuvent être mises en lien avec une étude antérieure ayant montré que les performances en calcul mental étaient corrélées aux capacités de MT de l'ordre sériel (Attout & Majerus, 2015). L'amélioration des performances en calcul mental de MV après la remédiation pourrait donc refléter un effet de transfert distant, en lien avec l'augmentation des capacités de MT de l'ordre sériel. Toutefois, les mesures de transfert intermédiaire se sont

davantage améliorées que la tâche de transfert proche, ce qui est peu compatible avec une réelle augmentation des capacités de MT de l'ordre sériel chez MV. Ces données suggèrent plutôt un apprentissage de la stratégie de codage spatiale de l'information sérielle durant l'entraînement, qui est transférable uniquement sur les tâches qui impliquent le maintien en MT de 6 items au maximum. En effet, l'épreuve de reconstruction de l'ordre sériel implique des listes qui comportent jusqu'à 7 items tandis que la tâche de RSI comporte des listes impliquant 5 items maximum. Ainsi, nos résultats concernant MV suggèrent que l'amélioration des performances sur les tâches de MT de l'ordre sériel reflètent surtout le développement de nouvelles stratégies, plutôt qu'une augmentation des capacités de MT de l'ordre sériel.

Les effets contrastés entre les deux participants ayant bénéficié d'une remédiation de la MT de l'ordre sériel soulignent l'intérêt d'explorer davantage les mécanismes qui sous-tendent le déficit de MT de l'ordre sériel dans la dyslexie. En effet, s'il existe des troubles de la MT impliquant des difficultés d'attention spatiale ou de spatialisation en MT, nous pouvons nous demander si l'entraînement à la MT de l'ordre sériel constitue réellement une approche adaptée pour ce type de trouble. Autrement dit, alors qu'une remédiation de la MT de l'ordre sériel pourrait être bénéfique pour les enfants qui présentent un déficit de MT considéré comme spécifique, nous pouvons faire l'hypothèse que d'autres interventions ciblant plus particulièrement les capacités spatiales (attention spatiale, représentation de l'espace, spatialisation) seraient davantage adéquates pour des enfants rencontrant des difficultés dans ces domaines. Il est probable que les séances que nous avons proposées afin de d'entraîner au codage spatial de l'information sériel en MT n'étaient pas suffisantes pour ce type de difficultés.

Une limite de nos travaux concerne la durée de la remédiation. En effet, nous n'avons proposé que 9h de remédiation alors que les études ayant montré des effets significatifs avec l'approche cognitive proposaient au minimum 12h d'entraînement (Delage et al., 2021, 2023; Stanford et al., 2019). Il a été démontré que le transfert des effets des entraînements de MT sur des tâches qui partagent des paradigmes similaires était plus important chez les enfants ayant des capacités de raisonnement fluide plus élevées (Gathercole et al., 2019). Cela signifie que certains facteurs cognitifs peuvent moduler les effets d'un entraînement de la MT. Concernant nos données, il est possible qu'il existe des différences entre les participants

concernant le temps nécessaires pour obtenir les bénéfices d'une remédiation de la MT et/ou pour automatiser des stratégies de compensation. Ainsi, nos résultats contrastés peuvent aussi être en lien avec un temps de remédiation insuffisant pour certains adolescents dyslexiques.

### **3.3 L'implication de facteurs non cognitifs ?**

Au regard des résultats contrastés concernant les effets de la remédiation ciblée malgré des déficits de MT similaires, nous pouvons questionner des facteurs non cognitifs qui ont pu moduler l'efficacité de l'entraînement. Premièrement, nous pouvons nous demander dans quelles mesures les quatre adolescents étaient tous en capacité de s'investir pleinement dans les séances d'entraînement dans le contexte de la crise sanitaire. En effet, les entraînements ont débuté environ 1 an après le début de la crise sanitaire. Les adolescents étaient donc exposés à des facteurs de stress liés au troisième confinement. Schulte-Körne (2010) a observé que 40 à 60 % des enfants dyslexiques présentaient des symptômes d'anxiété et de dépression. Plus récemment, il a été montré que le temps consacré aux devoirs et le niveau de stress jouaient un rôle de médiateur dans l'association entre la dyslexie et les symptômes anxieux/dépressifs (Xiao et al., 2022). Ces résultats peuvent être mis en lien avec les problématiques de burnout scolaire qui se caractérise par un épuisement émotionnel face aux exigences de l'école avec une fatigue chronique liée à une surcharge de travail scolaire (Meylan et al., 2015). Le burnout scolaire implique également une perte d'intérêt pour la scolarité et un manque d'accomplissement personnel dans le travail scolaire. Ainsi, nous n'avons pas évalué le niveau de stress scolaire alors qu'il pourrait constituer un obstacle important aux bénéfices d'une remédiation auprès d'enfants ou d'adolescents avec une dyslexie qui seraient beaucoup moins en capacité de s'investir durant les séances. De plus, des échelles évaluant l'intérêt et la motivation à l'égard de la remédiation auraient permis de prendre en compte ces facteurs. Ce questionnaire concernant le burnout scolaire et les symptômes anxieux/dépressifs peut s'inscrire au-delà du contexte de la crise sanitaire liée au Covid 19. En effet, si la remédiation ciblée de la MT a pour objectif une amélioration de la qualité de vie des enfants et des adolescents ainsi qu'une meilleure accessibilité aux apprentissages scolaires, il semble indispensable de prendre en compte le contexte singulier de la personne au-delà des aspects cognitifs. Dans cette perspective, la collaboration entre les

professionnels de santé et les enseignants pour la mise en place d'aménagements scolaires semble être un prérequis indispensable à la remédiation afin de limiter l'épuisement scolaire et de soutenir l'accès aux apprentissages. La mise en place d'interventions thérapeutiques concernant l'anxiété et la dépression des enfants et des adolescents avec une dyslexie est également à considérer avant de proposer une remédiation de la MT.

Deuxièmement, nous pouvons nous demander si les séances proposées à distance constituaient une limite concernant les effets potentielles d'une remédiation de la MT. En effet, la remédiation devait initialement être proposée en séance individuelle en présentiel. Cependant, les séances ont été réalisées à distance en raison de la crise sanitaire. La neuropsychologie à distance s'est particulièrement développée durant la crise sanitaire liée au Covid 19 (Hewitt & Loring, 2020). Une récente méta-analyse a étudié l'efficacité de la remédiation cognitive à distance en comparaison aux effets de la remédiation en présentiel chez des personnes présentant différents troubles neurologiques (Cacciante et al., 2022). Les données ont montré qu'il n'y avait pas d'effet de la modalité de remédiation sur les capacités attentionnelles, les mesures cognitives globales et les performances de mémoire, tandis que la modalité à distance montrait de meilleurs résultats pour la MT et les fonctions exécutives. Cependant, cette méta-analyse incluait seulement sept études randomisées. Une autre méta-analyse a étudié l'efficacité de la psychothérapie en visioconférence plus spécifiquement chez les enfants et leurs parents (Von Wirth et al., 2023). Les auteurs ont inclus douze études et ont observé que la psychothérapie à distance en visioconférence était aussi efficace que la thérapie en présentiel. Il est ainsi possible que la modalité en distanciel n'ait pas eu de répercussions négatives sur l'efficacité de la remédiation. En revanche, il était parfois difficile pour un des adolescents (MV) de trouver un lieu calme et sans bruit adapté pour les séances de remédiation. Afin de limiter les déplacements et la fatigue des enfants, des adolescents et de leurs familles, les remédiations à distance pourraient constituer une modalité de soutien complémentaire intéressante, à condition de s'assurer que les séances puissent s'effectuer au domicile dans un lieu calme et confortable.

Troisièmement, les effets de l'alliance thérapeutique peuvent être questionnés. En effet, l'alliance thérapeutique pourrait expliquer jusqu'à 30% des effets des psychothérapies (Flückiger et al., 2012). Cette importance de l'alliance thérapeutique ne concerne pas uniquement le champ de la psychothérapie puisque les résultats d'une méta-analyse ont



suggéré qu'une alliance thérapeutique de qualité pouvait améliorer les effets des interventions des kinésithérapeutes concernant les douleurs musculo-squelettiques chroniques (Kinney et al., 2020). Au regard de ces éléments, l'alliance thérapeutique pourrait également constituer un facteur important concernant les bénéfices d'un entraînement de la MT. Ainsi, une évaluation de l'alliance thérapeutique dans l'étude 3 aurait permis de prendre en compte ce facteur qui peut avoir des effets modérateurs sur l'efficacité d'une remédiation.

#### **4. Implications cliniques**

Nos données concernant l'hétérogénéité et la spécificité des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel apportent des implications potentielles pour la pratique clinique. Lorsqu'un enfant dyslexique présente des difficultés sur une tâche d'empan de mots ou de non-mots, il semble important de mener des investigations supplémentaires afin de déterminer si ces déficits de MT concernent le maintien de l'item ou de l'ordre sériel. Pour cela, l'utilisation de tâches non verbales de reconstruction de l'ordre sériel peut permettre d'évaluer plus précisément la MT de l'ordre sériel indépendamment des capacités phonologiques et de MT de l'item. A l'inverse, la tâche de répétition différée de non-mot semble pertinente pour évaluer la MT de l'item indépendamment de la MT de l'ordre sériel. Par ailleurs, au regard de nos résultats qui suggèrent que les troubles phonologiques des enfants dyslexiques dans certaines tâches sont consécutifs à leurs déficits de MT, il pourrait être pertinent de privilégier des outils qui impliquent peu la MT afin d'évaluer plus directement les compétences phonologiques. Dans cette perspective, des épreuves de discrimination phonémique et de fusion de phonèmes/syllabes à partir d'images pourraient être davantage adaptés pour les enfants qui présentent des déficits de MT.

Nos résultats, soulignent l'importance de considérer la dyslexie comme un trouble multifactoriel pouvant impliquer aussi bien des troubles phonologiques, attentionnels ainsi que des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel lorsqu'il s'agit d'étudier l'efficacité de nouvelles stratégies de remédiation. Si nous considérons la dyslexie comme un trouble multifactoriel, une remédiation ciblée de la MT de l'item ou de l'ordre sériel pourrait constituer une approche complémentaire aux interventions traditionnelles portant sur la

lecture, l'orthographe et les compétences phonologiques. En effet, certains de nos résultats suggèrent qu'une remédiation ciblée de la MT de l'item peut améliorer les capacités de MT de l'item ainsi que les performances en lecture. De plus, même si l'augmentation des capacités de MT et le transfert sur les apprentissages n'a pas été observé dans la même mesure pour tous les participants, nos données sont également compatibles avec le développement de nouvelles stratégies pouvant faciliter le maintien des informations en MT. Nos résultats soulignent toutefois l'importance de poursuivre les recherches évaluant l'efficacité des remédiations de la MT de l'item et de l'ordre sériel.

## **5. Limites et perspectives de recherche**

Plusieurs limites ont déjà été évoquées dans les sections précédentes. Par ailleurs, la taille de notre échantillon d'enfants dyslexiques (N= 25) et d'enfants normo-lecteurs (N=30) constitue également une limite de nos travaux. De plus, notre étude n'a pas investigué les relations entre la MT de l'item et la MT de l'ordre sériel dans une approche longitudinale, en prenant également en compte les possibles effets des rééducations orthophoniques ciblant les représentations phonologiques et la MT. Comme notre groupe d'enfants dyslexiques était âgé de 9 ans à 14 ans et avait déjà bénéficié d'une prise en charge orthophonique, nous ne pouvons pas exclure que certains de nos résultats reflètent des trajectoires développementales distinctes modulées en partie par les interventions orthophoniques. L'ensemble de ces éléments peut ainsi limiter la généralisation de nos résultats.

L'étude visant à explorer l'efficacité d'une remédiation ciblée de la MT de l'item et de l'ordre sériel dans la dyslexie comporte également plusieurs limites. Outre le nombre de participants (N = 4) dans le contexte de la crise sanitaire liée au Covid-19, l'étude 3 concernait uniquement des adolescents et nous n'avons pas mesurer le maintien à long terme des effets de la remédiation. La généralisation de nos résultats concernant les potentiels effets d'un entraînement de la MT est donc limitée. Des études complémentaires utilisant l'approche cognitive de la remédiation de la MT avec de plus grands échantillons et différentes tranches d'âge seraient donc nécessaires pour confirmer et généraliser nos résultats. Pour les recherches futures, cela implique d'inclure des participants en fonction de la nature de leurs

déficits de MT, et pas uniquement selon leur diagnostic. Cela permettrait d'étudier l'efficacité de remédiations ciblées de la MT mais également, les facteurs pouvant moduler les effets de ces entraînements chez l'enfant et l'adolescent.

De plus, si nos travaux suggèrent une spécificité des déficits de MT de l'item et de l'ordre sériel, les mécanismes qui sous-tendent ces troubles sont encore peu connus. D'une part, des études supplémentaires permettraient de préciser davantage le rôle l'attention spatiale et de l'apprentissage séquentiel dans les déficits de MT de l'ordre sériel dans la dyslexie. D'autres part, si nous considérons que le déficit de MT de l'item des personnes dyslexiques peut constituer un déficit spécifique de maintien en MT des informations phonologiques, les causes de l'oubli des informations stockées en MT font encore débat dans la littérature. En effet, certaines théories considèrent que l'oubli des informations en MT résulte d'un déclin temporel des représentations en MT (Baddeley & Hitch, 2019; Camos & Barrouillet, 2014b; Cowan, 1999), tandis que d'autres approches considèrent que cet oubli est généré par l'interférence entre les représentations activées en MT (Nairne, 1990 ; Saito & Miyake, 2004 (Oberauer & Lewandowsky, 2013). Il a également été proposé que le déficit de maintien des représentations langagières en MT résulte d'une augmentation pathologique de la vitesse de dégradation de l'activation temporaire de ces représentations (Martin, 1992; Martin et al., 1996). Dans ce contexte, des études explorant davantage les mécanismes qui sous-tendent les déficits de MT de l'item pourraient être menées, afin de soutenir l'élaboration de stratégies de remédiation ciblant spécifiquement des mécanismes spécifiques tels que le déclin temporel des information, l'interférence entre les représentations ou bien l'augmentation pathologique de la vitesse de dégradation de ces représentations.



## CONCLUSION

Ce travail de thèse a essayé de préciser la nature des déficits de MT dans la dyslexie et d'explorer la potentielle efficacité d'une remédiation ciblée de la MT dans ce trouble neurodéveloppemental. Dans une approche multifactorielle de la dyslexie, le présent travail a permis de mettre en évidence des déficits de la MT distincts et hétérogènes dans un groupe d'enfants dyslexiques. Certains enfants dyslexiques présentaient un déficit de MT de l'item tandis que d'autre présentait un trouble de MT de l'ordre sériel. Ces résultats soulignent l'importance d'utiliser des outils d'évaluation spécifiques dans la pratique clinique, afin de dissocier précisément les différents déficits de MT chez les enfants dyslexiques. Nos études permettent de renforcer l'hypothèse d'un trouble spécifique et central de la MT de l'ordre sériel chez certains enfants dyslexiques. Des recherches futures restent toutefois nécessaires afin d'étudier les interactions de ce déficit de MT de l'ordre sériel avec l'attention spatiale et les capacités d'apprentissage implicite de séquences. Nos données permettent également d'étayer l'hypothèse d'un déficit spécifique de MT de l'item dans la dyslexie, qui n'est pas uniquement la conséquence d'un trouble phonologique ou attentionnel. Des études supplémentaires pourraient toutefois être menées afin de préciser dans quelles mesures ce déficit de MT de l'item résulte d'un déclin temporel des représentations phonologiques activée en MT et/ou de l'interférence entre ces représentations. Nos résultats suggèrent également que les difficultés des enfants dyslexiques dans les tâches phonologiques qui impliquent le maintien d'informations verbales pourraient être consécutives à leur déficit de MT de l'item. Chez les enfants avec une dyslexie, il pourrait donc être pertinent de privilégier des outils d'évaluation clinique qui impliquent peu la MT afin de mesurer plus directement les compétences phonologiques. Ce travail souligne par ailleurs l'intérêt de privilégier l'approche cognitive afin d'élaborer des remédiations de la MT dans la dyslexie. Toutefois, si certaines de nos données suggèrent des effets potentiels d'une remédiation ciblée de la MT de l'item et de l'ordre sériel, elles montrent également l'importance de mener d'autres études avant de pouvoir généraliser nos résultats. Il s'agirait notamment de répliquer notre étude de cas multiples dans une étude de groupe en augmentant la durée de la remédiation, en explorant les facteurs pouvant moduler les effets des entraînements et en examinant les effets à long terme.



## Références bibliographiques

- Abdel-Khalek, A. M. (2005). Reliability and Factorial Validity of the Standard Progressive Matrices among Kuwaiti Children Ages 8 to 15 Years. *Perceptual and Motor Skills*, 101(2), 409-412. <https://doi.org/10.2466/pms.101.2.409-412>
- 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. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00932>
- Aguert, M., & Capel, A. (2018). Mieux comprendre les scores z pour bien les utiliser. *Rééducation orthophonique*, 274, 61-85.
- Aksayli, N. D., Sala, G., & Gobet, F. (2019). The cognitive and academic benefits of Cogmed : A meta-analysis. *Educational Research Review*, 27, 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.003>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003>
- Alt, M., Fox, A., Levy, R., Hogan, T. P., Cowan, N., & Gray, S. (2022). Phonological working memory and central executive function differ in children with typical development and dyslexia. *Dyslexia*, 28(1), 20-39. <https://doi.org/10.1002/dys.1699>
- Attout, L., Grégoire, C., & Majerus, S. (2020). How robust is the link between working memory for serial order and lexical skills in children? *Cognitive Development*, 53, 100854. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2020.100854>
- Attout, L., & Majerus, S. (2015). Working memory deficits in developmental dyscalculia : The importance of serial order. *Child Neuropsychology*, 21(4), 432-450. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.922170>
- Attout, L., Ordonez Magro, L., Szmalec, A., & Majerus, S. (2019). The developmental neural substrates of item and serial order components of verbal working memory. *Human Brain Mapping*, 40(5), 1541-1553. <https://doi.org/10.1002/hbm.24466>
- 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(3-4), 355-382. <https://doi.org/10.1080/02687038.2011.604303>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (2019). The phonological loop as a buffer store : An update. *Cortex*, 112, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.05.015>

- Barbosa, T., Rodrigues, C. C., Mello, C. B. de, Silva, M. C. de S. e, & Bueno, O. F. A. (2019). Executive functions in children with dyslexia. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 77(4), 254-259. <https://doi.org/10.1590/0004-282x20190033>
- 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. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.3.570>
- 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. <https://doi.org/10.1037/a0014615>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using **lme4**. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beeson, P. M., & Egnor, H. (2006). Combining treatment for written and spoken naming. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 12(06). <https://doi.org/10.1017/S1355617706061005>
- Beeson, P. M., Magloire, J. G., & Robey, R. R. (2005). Letter-By-Letter Reading : Natural Recovery and Response to Treatment. *Behavioural Neurology*, 16(4), 191-202. <https://doi.org/10.1155/2005/413962>
- Beeson, P. M., & Robey, R. R. (2006). Evaluating Single-Subject Treatment Research : Lessons Learned from the Aphasia Literature. *Neuropsychology Review*, 16(4), 161-169. <https://doi.org/10.1007/s11065-006-9013-7>
- Beneventi, H., Tønnessen, F. E., Erslund, L., & Hugdahl, K. (2010). Executive working memory processes in dyslexia : Behavioral and fMRI evidence: Working memory deficit in dyslexia. *Scandinavian Journal of Psychology*, 51(3), 192-202. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.2010.00808.x>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate : A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Ben-Yishay, Y. (2008). Foreword. *Neuropsychological Rehabilitation*, 18(5-6), 513-521. <https://doi.org/10.1080/09602010802141525>
- Berninger, V. W., Abbott, R. D., Thomson, J., Wagner, R., Swanson, H. L., Wijsman, E. M., & Raskind, W. (2009). Modeling Phonological Core Deficits Within a Working Memory Architecture in Children and Adults With Developmental Dyslexia. *Scientific Studies of Reading*, 10(2), 165-198. [https://doi.org/10.1207/s1532799xssr1002\\_3](https://doi.org/10.1207/s1532799xssr1002_3)
- Berthier, M. L., Dávila, G., Green-Heredia, C., Moreno Torres, I., Juárez Y Ruiz De Mier, R., De-Torres, I., & Ruiz-Cruces, R. (2014). Massed sentence repetition training can augment and speed up



recovery of speech production deficits in patients with chronic conduction aphasia receiving donepezil treatment. *Aphasiology*, 28(2), 188-218. <https://doi.org/10.1080/02687038.2013.861057>

Bharadwaj, S. V., Yeatts, P., & Headley, J. (2022). Efficacy of cogmed working memory training program in improving working memory in school-age children with and without neurological insults or disorders : A meta-analysis. *Applied Neuropsychology: Child*, 11(4), 891-903. <https://doi.org/10.1080/21622965.2021.1920943>

Binamé, F., & Poncelet, M. (2016). Order short-term memory capacity predicts nonword reading and spelling in first and second grade. *Reading and Writing*, 29(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11145-015-9577-9>

Bogaerts, L., Szmalec, A., Hachmann, W. M., Page, M. P. A., & Duyck, W. (2015). Linking memory and language : Evidence for a serial-order learning impairment in dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 43-44, 106-122. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.06.012>

Bogaerts, L., Szmalec, A., Hachmann, W. M., Page, M. P. A., Woumans, E., & Duyck, W. (2015). Increased susceptibility to proactive interference in adults with dyslexia? *Memory*, 23(2), 268-277. <https://doi.org/10.1080/09658211.2014.882957>

Bogon, J., Finke, K., Schulte-Körne, G., Müller, H. J., Schneider, W. X., & Stenneken, P. (2014). Parameter-based assessment of disturbed and intact components of visual attention in children with developmental dyslexia. *Developmental Science*, 17(5), 697-713. <https://doi.org/10.1111/desc.12150>

Bonin, P., Méot, A., Ferrand, L., & Roux, S. (2011). L'imageabilité : Normes et relations avec d'autres variables psycholinguistiques. *L'Année Psychologique*, 111(02), 327. <https://doi.org/10.4074/S0003503311002041>

Bosse, M.-L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia : The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198-230. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.05.009>

Bosse, M.-L., & Valdois, S. (2003). Patterns of developmental dyslexia according to a multi-trace memory model of reading. *Current psychology letters*, 10, Vol. 1, 2003. <https://doi.org/10.4000/cpl.92>

Brown, G. D. A., Preece, T., & Hulme, C. (2000). Oscillator-based memory for serial order. *Psychological Review*, 107(1), 127-181. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.107.1.127>

Burgess, N., & Hitch, G. J. (1999). Memory for serial order : A network model of the phonological loop and its timing. *Psychological Review*, 106(3), 551-581. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.106.3.551>

- Burgess, N., & Hitch, G. J. (2006). A revised model of short-term memory and long-term learning of verbal sequences. *Journal of Memory and Language*, 55(4), 627-652. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2006.08.005>
- Cabbage, K., Brinkley, S., Gray, S., Alt, M., Cowan, N., Green, S., Kuo, T., & Hogan, T. P. (2017). Assessing Working Memory in Children : The Comprehensive Assessment Battery for Children &#8211; Working Memory (CABC-WM). *Journal of Visualized Experiments*, 124, 55121. <https://doi.org/10.3791/55121>
- Cacciante, L., Pietà, C. D., Rutkowski, S., Cieřlik, B., Szczepańska-Gieracha, J., Agostini, M., & Kiper, P. (2022). Cognitive telerehabilitation in neurological patients : Systematic review and meta-analysis. *Neurological Sciences*, 43(2), 847-862. <https://doi.org/10.1007/s10072-021-05770-6>
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014a). Attentional and non-attentional systems in the maintenance of verbal information in working memory : The executive and phonological loops. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00900>
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014b). Le développement de la mémoire de travail : Perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie Française*, 59(1), 21-39. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2012.12.003>
- Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91(1), 77-111. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00164-1)
- Catts, H. W., Adlof, S. M., Hogan, T. P., & Weismer, S. E. (2005). Are Specific Language Impairment and Dyslexia Distinct Disorders? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 48(6), 1378-1396. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2005/096\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2005/096))
- Clarke, P., Hulme, C., & Snowling, M. (2005). Individual differences in RAN and reading : A response timing analysis. *Journal of Research in Reading*, 28(2), 73-86. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2005.00255.x>
- Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (2021). *La dyslexie de l'enfant à l'adulte*. Dunod.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC : A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204-256. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.1.204>
- Cowan, N. (1999). An Embedded-Processes Model of Working Memory. In A. Miyake & P. Shah (Éds.), *Models of Working Memory* (1<sup>re</sup> éd., p. 62-101). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174909.006>
- Cowan, N., Fristoe, N. M., Elliott, E. M., Brunner, R. P., & Sauls, J. S. (2006). Scope of attention, control of attention, and intelligence in children and adults. *Memory & Cognition*, 34(8), 1754-1768. <https://doi.org/10.3758/BF03195936>

- Cowan, N., Hogan, T. P., Alt, M., Green, S., Cabbage, K. L., Brinkley, S., & Gray, S. (2017). Short-term Memory in Childhood Dyslexia : Deficient Serial Order in Multiple Modalities: Serial Order Memory in Dyslexia. *Dyslexia*, 23(3), 209-233. <https://doi.org/10.1002/dys.1557>
- Crawford, J. R., & Howell, D. C. (1998). Comparing an individual's test score against norms derived from small samples. *Clinical Neuropsychologist*, 12(4), 482-486. <https://doi.org/10.1076/clin.12.4.482.7241>
- De Belder, M., Abrahamse, E., Kerckhof, M., Fias, W., & Van Dijck, J.-P. (2015). Serial Position Markers in Space : Visuospatial Priming of Serial Order Working Memory Retrieval. *PLOS ONE*, 10(1), e0116469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116469>
- De Carvalho, C. A. F., Kida, A. D. S. B., Capellini, S. A., & De Avila, C. R. B. (2014). Phonological working memory and reading in students with dyslexia. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00746>
- De Groot, B. J. A., Van Den Bos, K. P., Van Der Meulen, B. F., & Minnaert, A. E. M. G. (2015). Rapid Naming and Phonemic Awareness in Children With Reading Disabilities and/or Specific Language Impairment : Differentiating Processes? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 58(5), 1538-1548. [https://doi.org/10.1044/2015\\_JSLHR-L-14-0019](https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-L-14-0019)
- De Visscher, A., Berens, S. C., Keidel, J. L., Noël, M.-P., & Bird, C. M. (2015). The interference effect in arithmetic fact solving : An fMRI study. *NeuroImage*, 116, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.063>
- Delage, H., Stanford, E., Baratti, C., & Durrleman, S. (2023). Working memory training in children with developmental language disorder : Effects on complex syntax in narratives. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 3, 1068959. <https://doi.org/10.3389/fresc.2022.1068959>
- Delage, H., Stanford, E., & Durrleman, S. (2021). Working memory training enhances complex syntax in children with Developmental Language Disorder. *Applied Psycholinguistics*, 42(5), 1341-1375. <https://doi.org/10.1017/S0142716421000369>
- Delage, H., Stanford, E., Piller, A.-G., & Durrleman, S. (2020). Entraînement de la mémoire de travail : Quels effets sur la mémoire et la syntaxe d'enfants présentant un trouble développemental du langage ? *ANAE*, 32(166), 001-011.
- Demont, E., & Botzung, A. (2003). Contribution de la conscience phonologique et de la mémoire de travail aux difficultés en lecture : Étude auprès d'enfants dyslexiques et apprentis lecteurs. *L'année psychologique*, 103(3), 377-409. <https://doi.org/10.3406/psy.2003.29642>
- Demoulin, C., & Kolinsky, R. (2016). Does learning to read shape verbal working memory? *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(3), 703-722. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0956-7>
- Dunn, L., Theriault-Whalen, C., & Dunn, M. (1993). *Echelle de vocabulaire en images Peabody*. ATM.

- Expertise collective de L'INSERM. (2007). *Dyslexie, Dysorthographe, Dyscalculie : Bilan des données scientifiques* (INSERM).
- Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., Molteni, M., & Zorzi, M. (2010). Multisensory Spatial Attention Deficits Are Predictive of Phonological Decoding Skills in Developmental Dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(5), 1011-1025. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21232>
- Flückiger, C., Del Re, A. C., Wampold, B. E., Symonds, D., & Horvath, A. O. (2012). How central is the alliance in psychotherapy? A multilevel longitudinal meta-analysis. *Journal of Counseling Psychology*, *59*(1), 10-17. <https://doi.org/10.1037/a0025749>
- Francis, D., Clark, N., & Humphreys, G. (2003). The treatment of an auditory working memory deficit and the implications for sentence comprehension abilities in mild « receptive » aphasia. *Aphasiology*, *17*(8), 723-750. <https://doi.org/10.1080/02687030344000201>
- Gabay, Y., Gabay, S., Schiff, R., & Henik, A. (2020). Visual and Auditory Interference Control of Attention in Developmental Dyslexia. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *26*(4), 407-417. <https://doi.org/10.1017/S135561771900122X>
- Garcia, R. B., Mammarella, I. C., Tripodi, D., & Cornoldi, C. (2014). Visuospatial working memory for locations, colours, and binding in typically developing children and in children with dyslexia and non-verbal learning disability. *British Journal of Developmental Psychology*, *32*(1), 17-33. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12019>
- Gathercole, S. E., Alloway, T. P., Willis, C., & Adams, A.-M. (2006). Working memory in children with reading disabilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, *93*(3), 265-281. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.08.003>
- Gathercole, S. E., Dunning, D. L., Holmes, J., & Norris, D. (2019). Working memory training involves learning new skills. *Journal of Memory and Language*, *105*, 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2018.10.003>
- Gathercole, S. E., Woolgar, F., Kievit, R. A., Astle, D., Manly, T., Holmes, J., & CALM Team. (2016). How common are WM deficits in children with difficulties in reading and mathematics? *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, *5*(4), 384-394. <https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2016.07.013>
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Byrd-Craven, J. (2008). Development of Number Line Representations in Children With Mathematical Learning Disability. *Developmental Neuropsychology*, *33*(3), 277-299. <https://doi.org/10.1080/87565640801982361>
- Georgiou, G. K., Parrila, R., Kirby, J. R., & Stephenson, K. (2008). Rapid Naming Components and Their Relationship With Phonological Awareness, Orthographic Knowledge, Speed of Processing,

and Different Reading Outcomes. *Scientific Studies of Reading*, 12(4), 325-350.  
<https://doi.org/10.1080/10888430802378518>

Germano, G. D., Reilhac, C., Capellini, S. A., & Valdois, S. (2014). The phonological and visual basis of developmental dyslexia in Brazilian Portuguese reading children. *Frontiers in Psychology*, 5.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01169>

Geurten, M., Majerus, S., Lejeune, C., & Catale, C. (2018). Questionnaire of Memory (Q-MEM) : A new measure of everyday memory functioning in school-age children. *Applied Neuropsychology: Child*, 7(1), 44-51. <https://doi.org/10.1080/21622965.2016.1239201>

Gioia, G., Isquith, P., Guy, S., & Kenworthy, L. (2000). *Behavior Rating Inventory of Executive Function : BRIEF*. Psychological Assessment Resources.

Giorgetti, M., & Lorusso, M. L. (2019). Specific conditions for a selective deficit in memory for order in children with dyslexia. *Child Neuropsychology*, 25(6), 742-771.  
<https://doi.org/10.1080/09297049.2018.1530746>

Gombert, J. E. (1992). *Metalinguistic development*. Harvester Wheatsheaf.

Gorin, S., Kowialiewski, B., & Majerus, S. (2016). Domain-Generality of Timing-Based Serial Order Processes in Short-Term Memory : New Insights from Musical and Verbal Domains. *PLOS ONE*, 11(12), e0168699. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168699>

Goswami, U. (2000). Phonological representations, reading development and dyslexia : Towards a cross-linguistic theoretical framework. *Dyslexia*, 6(2), 133-151.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0909\(200004/06\)6:2<133::AID-DYS160>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0909(200004/06)6:2<133::AID-DYS160>3.0.CO;2-A)

Gray, S., Fox, A. B., Green†, S., Alt, M., Hogan, T. P., Petscher, Y., & Cowan, N. (2019). Working Memory Profiles of Children With Dyslexia, Developmental Language Disorder, or Both. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(6), 1839-1858.  
[https://doi.org/10.1044/2019\\_JSLHR-L-18-0148](https://doi.org/10.1044/2019_JSLHR-L-18-0148)

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. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2016.06.004>

Guida, A., & Campitelli, G. (2019). Explaining the SPoARC and SNARC effects with knowledge structures : An expertise account. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26(2), 434-451.  
<https://doi.org/10.3758/s13423-019-01582-0>

Guida, A., Fartoukh, M., & Mathy, F. (2020). The development of working memory spatialization revealed by using the cave paradigm in a two-alternative spatial choice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1477(1), 54-70. <https://doi.org/10.1111/nyas.14433>

- Guida, A., Leroux, A., Lavielle-Guida, M., & Noël, Y. (2016). A SPoARC in the Dark : Spatialization in Verbal Immediate Memory. *Cognitive Science*, 40(8), 2108-2121. <https://doi.org/10.1111/cogs.12316>
- Guida, A., Megreya, A. M., Lavielle-Guida, M., Noël, Y., Mathy, F., Van Dijck, J.-P., & Abrahamse, E. (2018). Spatialization in working memory is related to literacy and reading direction : Culture “literarily” directs our thoughts. *Cognition*, 175, 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.02.013>
- Guitard, D., Saint-Aubin, J., & Cowan, N. (2021). Asymmetrical interference between item and order information in short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 47(2), 243-263. <https://doi.org/10.1037/xlm0000956>
- Guitard, D., Saint-Aubin, J., Poirier, M., Miller, L. M., & Tolan, A. (2020). Forward and backward recall : Different visuospatial processes when you know what’s coming. *Memory & Cognition*, 48(1), 111-126. <https://doi.org/10.3758/s13421-019-00966-w>
- Gupta, P. (2006). Nonword repetition, phonological storage, and multiple determinations. *Applied Psycholinguistics*, 27(4), 564-568. <https://doi.org/10.1017/S0142716406260399>
- Habib, M., Lardy, C., Desiles, T., Commeiras, C., Chobert, J., & Besson, M. (2016). Music and Dyslexia : A New Musical Training Method to Improve Reading and Related Disorders. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00026>
- Hachmann, W. M., Bogaerts, L., Szmalec, A., Woumans, E., Duyck, W., & Job, R. (2014). Short-term memory for order but not for item information is impaired in developmental dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 64(2), 121-136. <https://doi.org/10.1007/s11881-013-0089-5>
- Hachmann, W. M., Cashdollar, N., Postiglione, F., & Job, R. (2020). The relationship of domain-general serial order memory and reading ability in school children with and without dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 193, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104789>
- Harris, L., Olson, A., & Humphreys, G. (2014). The link between STM and sentence comprehension : A neuropsychological rehabilitation study. *Neuropsychological Rehabilitation*, 24(5), 678-720. <https://doi.org/10.1080/09602011.2014.892885>
- Hedenius, M., Persson, J., Alm, P. A., Ullman, M. T., Howard, J. H., Howard, D. V., & Jennische, M. (2013). Impaired implicit sequence learning in children with developmental dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 34(11), 3924-3935. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.08.014>
- Henson, R. N. A. (1998). Short-Term Memory for Serial Order : The Start-End Model. *Cognitive Psychology*, 36(2), 73-137. <https://doi.org/10.1006/cogp.1998.0685>
- Hewitt, K. C., & Loring, D. W. (2020). Emory university telehealth neuropsychology development and implementation in response to the COVID-19 pandemic. *The Clinical Neuropsychologist*, 34(7-8), 1352-1366. <https://doi.org/10.1080/13854046.2020.1791960>

- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(5), 393-402. <https://doi.org/10.1038/nrn2113>
- Hokken, M. J., Krabbendam, E., van der Zee, Y. J., & Kooiker, M. J. G. (2022). Visual selective attention and visual search performance in children with CVI, ADHD, and Dyslexia : A scoping review. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 1-34. <https://doi.org/10.1080/09297049.2022.2057940>
- Holt, L. L., Tierney, A. T., Guerra, G., Laffere, A., & Dick, F. (2018). Dimension-selective attention as a possible driver of dynamic, context-dependent re-weighting in speech processing. *Hearing Research*, 366, 50-64. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.06.014>
- Howick, J. (2011). *The philosophy of evidence-based medicine*. Wiley-Blackwell, BMJ Books.
- Hurlstone, M. J., Hitch, G. J., & Baddeley, A. D. (2014). Memory for serial order across domains : An overview of the literature and directions for future research. *Psychological Bulletin*, 140(2), 339-373. <https://doi.org/10.1037/a0034221>
- Institut national de la statistique et des et des études économiques (INSEE). (2020). *Nomenclatures des professions et catégories socioprofessionnelles*.
- Jarrold, C., Thorn, A. S. C., & Stephens, E. (2009). The relationships among verbal short-term memory, phonological awareness, and new word learning : Evidence from typical development and Down syndrome. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102(2), 196-218. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.07.001>
- Jeffries, S., & Everatt, J. (2004). Working memory : Its role in dyslexia and other specific learning difficulties. *Dyslexia*, 10(3), 196-214. <https://doi.org/10.1002/dys.278>
- Jiménez-Fernández, G., Vaquero, J. M. M., Jiménez, L., & Defior, S. (2011). Dyslexic children show deficits in implicit sequence learning, but not in explicit sequence learning or contextual cueing. *Annals of Dyslexia*, 61(1), 85-110. <https://doi.org/10.1007/s11881-010-0048-3>
- Jones, M. W., Branigan, H. P., & Kelly, M. L. (2008). Visual deficits in developmental dyslexia : Relationships between non-linguistic visual tasks and their contribution to components of reading. *Dyslexia*, 14(2), 95-115. <https://doi.org/10.1002/dys.345>
- Jones, M. W., Branigan, H. P., Parra, M. A., & Logie, R. H. (2013). Cross-modal binding in developmental dyslexia. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 39(6), 1807-1822. <https://doi.org/10.1037/a0033334>
- Kalinyak-Fliszar, M., Kohen, F., & Martin, N. (2011). Remediation of language processing in aphasia : Improving activation and maintenance of linguistic representations in (verbal) short-term memory. *Aphasiology*, 25(10), 1095-1131. <https://doi.org/10.1080/02687038.2011.577284>

- Kalm, K., & Norris, D. (2014). The Representation of Order Information in Auditory-Verbal Short-Term Memory. *Journal of Neuroscience*, 34(20), 6879-6886. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4104-13.2014>
- Kassai, R., Futo, J., Demetrovics, Z., & Takacs, Z. K. (2019). A meta-analysis of the experimental evidence on the near- and far-transfer effects among children's executive function skills. *Psychological Bulletin*, 145(2), 165-188. <https://doi.org/10.1037/bul0000180>
- Keen, A. G., & Lovegrove, W. J. (2000). Transient deficit hypothesis and dyslexia : Examination of whole-parts relationship, retinal sensitivity, and spatial and temporal frequencies. *Vision Research*, 40(6), 705-715. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00208-4](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00208-4)
- Kibby, M. Y. (2009). There are Multiple Contributors to the Verbal Short-Term Memory Deficit in Children with Developmental Reading Disabilities. *Child Neuropsychology*, 15(5), 485-506. <https://doi.org/10.1080/09297040902748218>
- Kibby, M. Y., Marks, W., Morgan, S., & Long, C. J. (2004). Specific Impairment in Developmental Reading Disabilities : A Working Memory Approach. *Journal of Learning Disabilities*, 37(4), 349-363. <https://doi.org/10.1177/00222194040370040601>
- Kinney, M., Seider, J., Beaty, A. F., Coughlin, K., Dyal, M., & Clewley, D. (2020). The impact of therapeutic alliance in physical therapy for chronic musculoskeletal pain : A systematic review of the literature. *Physiotherapy Theory and Practice*, 36(8), 886-898. <https://doi.org/10.1080/09593985.2018.1516015>
- Koenig-Bruhin, M., & Studer-Eichenberger, F. (2007). Therapy of short-term memory disorders in fluent aphasia : A single case study. *Aphasiology*, 21(5), 448-458. <https://doi.org/10.1080/02687030600670593>
- Laasonen, M., Virsu, V., Oinonen, S., Sandbacka, M., Salakari, A., & Service, E. (2012). Phonological and sensory short-term memory are correlates and both affected in developmental dyslexia. *Reading and Writing*, 25(9), 2247-2273. <https://doi.org/10.1007/s11145-011-9356-1>
- Lallier, M., Donnadieu, S., & Valdois, S. (2013a). Developmental dyslexia : Exploring how much phonological and visual attention span disorders are linked to simultaneous auditory processing deficits. *Annals of Dyslexia*, 63(2), 97-116. <https://doi.org/10.1007/s11881-012-0074-4>
- Lallier, M., Donnadieu, S., & Valdois, S. (2013b). Investigating the role of visual and auditory search in reading and developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00597>
- Lancaster, H. S., Li, J., & Gray, S. (2021). Selective visual attention skills differentially predict decoding and reading comprehension performance across reading ability profiles. *Journal of Research in Reading*, 44(3), 715-734. <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12368>



- Landerl, K., Ramus, F., Moll, K., Lyytinen, H., Leppänen, P. H. T., Lohvansuu, K., O'Donovan, M., Williams, J., Bartling, J., Bruder, J., Kunze, S., Neuhoff, N., Tóth, D., Honbolygó, F., Csépe, V., Bogliotti, C., Iannuzzi, S., Chaix, Y., Démonet, J.-F., ... Schulte-Körne, G. (2013). Predictors of developmental dyslexia in European orthographies with varying complexity : Cross-linguistic predictors of dyslexia. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *54*(6), 686-694. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12029>
- Le Jan, G., Le Bouquin-Jeannès, R., Costet, N., Trolès, N., Scalart, P., Pichancourt, D., Faucon, G., & Gombert, J.-E. (2011). Multivariate predictive model for dyslexia diagnosis. *Annals of Dyslexia*, *61*(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11881-010-0038-5>
- Leclercq, A.-L., & Majerus, S. (2010). Serial-order short-term memory predicts vocabulary development : Evidence from a longitudinal study. *Developmental Psychology*, *46*(2), 417-427. <https://doi.org/10.1037/a0018540>
- Lefavrais, p. (2005). *Test de leximétrie de l'Alouette* (ECPA).
- Leinenger, M. (2014). Phonological coding during reading. *Psychological Bulletin*, *140*(6), 1534-1555. <https://doi.org/10.1037/a0037830>
- Lenhard, A., Lenhard, W., & Gary, S. (2019). Continuous norming of psychometric tests : A simulation study of parametric and semi-parametric approaches. *PLoS ONE*, *14*(9), 1-30. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222279>
- Lewandowska, M., Milner, R., Ganc, M., Włodarczyk, E., & Skarżyński, H. (2014). Attention Dysfunction Subtypes of Developmental Dyslexia. *Medical Science Monitor*, *20*, 2256-2268. <https://doi.org/10.12659/MSM.890969>
- Lobier, M., Zoubrinetzky, R., & Valdois, S. (2012). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *Cortex*, *48*(6), 768-773. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.09.003>
- Lotfi, S., Rostami, R., Shokoohi-Yekta, M., Ward, R. T., Motamed-Yeganeh, N., Mathew, A. S., & Lee, H.-J. (2020). Effects of computerized cognitive training for children with dyslexia : An ERP study. *Journal of Neurolinguistics*, *55*, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2020.100904>
- Loucas, T., Baird, G., Simonoff, E., & Slonims, V. (2016). Phonological processing in children with specific language impairment with and without reading difficulties : Phonological processing, language impairment and reading. *International Journal of Language & Communication Disorders*, *51*(5), 581-588. <https://doi.org/10.1111/1460-6984.12225>
- Lum, J. A. G., Ullman, M. T., & Conti-Ramsden, G. (2013). Procedural learning is impaired in dyslexia : Evidence from a meta-analysis of serial reaction time studies. *Research in Developmental Disabilities*, *34*(10), 3460-3476. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.07.017>

- Luo, Y., Wang, J., Wu, H., Zhu, D., & Zhang, Y. (2013). Working-memory training improves developmental dyslexia in Chinese children. *Neural Regeneration Research*, 8(5), 452-460. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5374.2013.05.009>
- Lyon, G. R., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2003). A definition of dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 53(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11881-003-0001-9>
- Maehler, C., Joerns, C., & Schuchardt, K. (2019). Training Working Memory of Children with and without Dyslexia. *Children*, 6(3), 47. <https://doi.org/10.3390/children6030047>
- Maehler, C., & Schuchardt, K. (2016). Working memory in children with specific learning disorders and/or attention deficits. *Learning and Individual Differences*, 49, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2016.05.007>
- Majerus, S. (2013a). Language repetition and short-term memory : An integrative framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00357>
- Majerus, S. (2013b). Verbal short-term memory and temporary activation of language representations : The importance of distinguishing item and order information. In *Interactions between short-term and long-term memory in the verbal domain*.
- Majerus, S. (2016). Optimisation et rééducation de la mémoire de travail : Une synthèse critique. *ANAE*, 28(141), 167-174.
- Majerus, S. (2018). Working memory treatment in aphasia : A theoretical and quantitative review. *Journal of Neurolinguistics*, 48, 157-175. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2017.12.001>
- Majerus, S. (2021). La rééducation de la mémoire de travail chez l'enfant : Mission impossible? In *Les fonctions exécutives chez l'enfant*. DeBoeck Supérieur.
- Majerus, S., Attout, L., Artielle, M.-A., & Van Der Kaa, M.-A. (2015). The heterogeneity of verbal short-term memory impairment in aphasia. *Neuropsychologia*, 77, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.08.010>
- Majerus, S., & Cowan, N. (2016). The nature of verbal short-term impairment in dyslexia : The importance of serial order. *Frontiers in Psychology*, 7(OCT). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01522>
- Majerus, S., Cowan, N., Péters, F., Van Calster, L., Phillips, C., & Schrouff, J. (2016). Cross-Modal Decoding of Neural Patterns Associated with Working Memory : Evidence for Attention-Based Accounts of Working Memory. *Cerebral Cortex*, 26(1), 166-179. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu189>
- Majerus, S., D'Argembeau, A., Martinez Perez, T., Belayachi, S., Van der Linden, M., Collette, F., Salmon, E., Seurinck, R., Fias, W., & Maquet, P. (2010). The Commonality of Neural Networks

for Verbal and Visual Short-term Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(11), 2570-2593. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21378>

Majerus, S., Norris, D., & Patterson, K. (2007). What does a patient with semantic dementia remember in verbal short-term memory? Order and sound but not words. *Cognitive Neuropsychology*, 24(2), 131-151. <https://doi.org/10.1080/02643290600989376>

Majerus, S., Péters, F., Bouffier, M., Cowan, N., & Phillips, C. (2018). The Dorsal Attention Network Reflects Both Encoding Load and Top-down Control during Working Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30(2), 144-159. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01195](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01195)

Majerus, S., Poncelet, M., Elsen, B., & Van Der Linden, M. (2006). Exploring the relationship between new word learning and short-term memory for serial order recall, item recall, and item recognition. *European Journal of Cognitive Psychology*, 18(6), 848-873. <https://doi.org/10.1080/09541440500446476>

Majerus, S., Poncelet, M., Greffe, C., & Van der Linden, M. (2006). Relations between vocabulary development and verbal short-term memory : The relative importance of short-term memory for serial order and item information. *Journal of Experimental Child Psychology*, 93(2), 95-119. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.07.005>

Majerus, S., Poncelet, M., & Van der Kaa, M.-A. (2016). La rééducation de la mémoire à court terme. In *Traité de neuropsychologie clinique, Tome II – 2ème édition*. Solal-DeBoeck.

Majerus, S., Van Der Kaa, M.-A., Renard, C., Van Der Linden, M., & Poncelet, M. (2005). Treating verbal short-term memory deficits by increasing the duration of temporary phonological representations : A case study. *Brain and Language*, 95(1), 174-175. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.07.094>

Manis, F. R., Seidenberg, M. S., Doi, L. M., McBride-Chang, C., & Petersen, A. (1996). On the bases of two subtypes of development dyslexia. *Cognition*, 58(2), 157-195. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(95\)00679-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(95)00679-6)

Marshuetz, C., Smith, E. E., Jonides, J., DeGutis, J., & Chenevert, T. L. (2000). Order Information in Working Memory : fMRI Evidence for Parietal and Prefrontal Mechanisms. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(Supplement 2), 130-144. <https://doi.org/10.1162/08989290051137459>

Martin, N. (1992). A computational account of deep dysphasia : Evidence from a single case study\*1. *Brain and Language*, 43(2), 240-274. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(92\)90130-7](https://doi.org/10.1016/0093-934X(92)90130-7)

Martin, N., Saffran, E. M., & Dell, G. S. (1996). Recovery in Deep Dysphasia : Evidence for a Relation between Auditory-Verbal STM Capacity and Lexical Errors in Repetition. *Brain and Language*, 52(1), 83-113. <https://doi.org/10.1006/brln.1996.0005>

- Martinez Perez, T., Majerus, S., Mahot, A., & Poncelet, M. (2012). Evidence for a Specific Impairment of Serial Order Short-term Memory in Dyslexic Children : Serial Order STM Deficits in Dyslexia. *Dyslexia*, 18(2), 94-109. <https://doi.org/10.1002/dys.1438>
- Martinez Perez, T., Majerus, S., & Poncelet, M. (2012). The contribution of short-term memory for serial order to early reading acquisition : Evidence from a longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(4), 708-723. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.11.007>
- Martinez Perez, T., Majerus, S., & Poncelet, M. (2013). Impaired short-term memory for order in adults with dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 34(7), 2211-2223. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.04.005>
- Martinez Perez, T., Poncelet, M., Salmon, E., & Majerus, S. (2015). Functional Alterations in Order Short-Term Memory Networks in Adults With Dyslexia. *Developmental Neuropsychology*, 40(7-8), 407-429. <https://doi.org/10.1080/87565641.2016.1153098>
- Martino, S. D., Espesser, R., Rey, V., & Habib, M. (2001). The “temporal processing deficit” hypothesis in dyslexia : New experimental evidence. *Brain and Cognition*, 46(1-2), 104-108. [https://doi.org/10.1016/S0278-2626\(01\)80044-0](https://doi.org/10.1016/S0278-2626(01)80044-0)
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame : An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, 44(2), 314-324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- McArthur, G., & Castles, A. (2013). Phonological processing deficits in specific reading disability and specific language impairment : Same or different?: PHONOLOGICAL PROCESSING DEFICITS IN SRD/SLI. *Journal of Research in Reading*, 36(3), 280-302. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2011.01503.x>
- McArthur, G. M., Hogben, J. H., Edwards, V. T., Heath, S. M., & Mengler, E. D. (2000). On the « specifics » of specific reading disability and specific language impairment. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 41(7), 869-874.
- McCarthy, L. M., Kalinyak-Fliszar, M., Kohen, F., & Martin, N. (2016). Effects of semantic context on access to words of low imageability in deep-phonological dysphasia : A treatment case study. *Aphasiology*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/02687038.2016.1208803>
- Melby-Lervåg, M., & Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, 49(2), 270-291. <https://doi.org/10.1037/a0028228>
- Melby-Lervåg, M., Redick, T. S., & Hulme, C. (2016). Working Memory Training Does Not Improve Performance on Measures of Intelligence or Other Measures of “Far Transfer” : Evidence From a Meta-Analytic Review. *Perspectives on Psychological Science*, 11(4), 512-534. <https://doi.org/10.1177/1745691616635612>

- Menghini, D., Finzi, A., Carlesimo, G. A., & Vicari, S. (2011). Working Memory Impairment in Children With Developmental Dyslexia: Is it Just a Phonological Deficity? *Developmental Neuropsychology*, *36*(2), 199-213. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549868>
- Messbauer, V. C. S., & de Jong, P. F. (2003). Word, nonword, and visual paired associate learning in Dutch dyslexic children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *84*(2), 77-96. [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(02\)00179-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(02)00179-0)
- Meylan, N., Doudin, P.-A., Curchod-Ruedi, D., & Stephan, P. (2015). Burnout scolaire et soutien social : L'importance du soutien des parents et des enseignants. *Psychologie Française*, *60*(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2014.01.003>
- Michel, C., Bidot, S., Bonnetblanc, F., & Quercia, P. (2011). Left minineglect or inverse pseudoneglect in children withdyslexia? *NeuroReport*, *22*(2), 93-96. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e328342d2df>
- Moura, O., Simões, M. R., & Pereira, M. (2015). Working Memory in Portuguese Children With Developmental Dyslexia. *Applied Neuropsychology: Child*, *4*(4), 237-248. <https://doi.org/10.1080/21622965.2014.885389>
- Mundy, I. R., & Hannant, P. (2020). Exploring the phonological profiles of children with reading difficulties : A multiple case study. *Dyslexia*, *26*(4), 411-426. <https://doi.org/10.1002/dys.1667>
- Nergård-Nilssen, T., & Hulme, C. (2014). Developmental Dyslexia in Adults: Behavioural Manifestations and Cognitive Correlates: Developmental Dyslexia in Adults. *Dyslexia*, *20*(3), 191-207. <https://doi.org/10.1002/dys.1477>
- New, B., Pallier, C., Brysbaert, M., & Ferrand, L. (2004). Lexique 2 : A new French lexical database. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *36*(3), 516-524. <https://doi.org/10.3758/BF03195598>
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1994). Reaction Times and Dyslexia. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *47*(1), 29-48. <https://doi.org/10.1080/14640749408401142>
- Nithart, C., Demont, E., Majerus, S., Leybaert, J., Poncelet, M., & Metz-Lutz, M.-N. (2009). Reading Disabilities in SLI and Dyslexia Result From Distinct Phonological Impairments. *Developmental Neuropsychology*, *34*(3), 296-311. <https://doi.org/10.1080/87565640902801841>
- Nithart, C., Demont, E., Metz-Lutz, M.-N., Majerus, S., Poncelet, M., & Leybaert, J. (2011). Early contribution of phonological awareness and later influence of phonological memory throughout reading acquisition : Phonological Awareness And Memory Predict Reading Acquisition. *Journal of Research in Reading*, *34*(3), 346-363. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2009.01427.x>

- Norris, D. G., Hall, J., & Gathercole, S. E. (2019). Can short-term memory be trained? *Memory & Cognition*, 47(5), 1012-1023. <https://doi.org/10.3758/s13421-019-00901-z>
- Norton, E. S., Beach, S. D., & Gabrieli, J. D. (2015). Neurobiology of dyslexia. *Current Opinion in Neurobiology*, 30, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.09.007>
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory : Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 28(3), 411-421.
- Oberauer, K., & Lewandowsky, S. (2013). Evidence against decay in verbal working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(2), 380-411. <https://doi.org/10.1037/a0029588>
- Oosterhuis, H. E. M., van der Ark, L. A., & Sijtsma, K. (2016). Sample Size Requirements for Traditional and Regression-Based Norms. *Assessment*, 23(2), 191-202. <https://doi.org/10.1177/1073191115580638>
- Ordonez Magro, L., Majerus, S., Attout, L., Poncelet, M., Smalle, E. H. M., & Szmalec, A. (2020). The contribution of serial order short-term memory and long-term learning to reading acquisition : A longitudinal study. *Developmental Psychology*, 56(9), 1671-1683. <https://doi.org/10.1037/dev0001043>
- Ordonez Magro, L., Majerus, S., Attout, L., Poncelet, M., Smalle, E. H. M., & Szmalec, A. (2021). Do serial order short-term memory and long-term learning abilities predict spelling skills in school-age children? *Cognition*, 206, 104479. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104479>
- Papagno, C., Comi, A., Riva, M., Bizzi, A., Vernice, M., Casarotti, A., Fava, E., & Bello, L. (2017). Mapping the brain network of the phonological loop : The Phonological Loop Brain Network. *Human Brain Mapping*, 38(6), 3011-3024. <https://doi.org/10.1002/hbm.23569>
- Peijnenborgh, J. C. A. W., Hurks, P. M., Aldenkamp, A. P., Vles, J. S. H., & Hendriksen, J. G. M. (2016). Efficacy of working memory training in children and adolescents with learning disabilities : A review study and meta-analysis. *Neuropsychological Rehabilitation*, 26(5-6), 645-672. <https://doi.org/10.1080/09602011.2015.1026356>
- Peng, P., Barnes, M., Wang, C., Wang, W., Li, S., Swanson, H. L., Dardick, W., & Tao, S. (2018). A meta-analysis on the relation between reading and working memory. *Psychological Bulletin*, 144(1), 48-76. <https://doi.org/10.1037/bul0000124>
- Pennington, B. F., Santerre-Lemmon, L., Rosenberg, J., MacDonald, B., Boada, R., Friend, A., Leopold, D. R., Samuelsson, S., Byrne, B., Willcutt, E. G., & Olson, R. K. (2012). Individual prediction of dyslexia by single versus multiple deficit models. *Journal of Abnormal Psychology*, 121(1), 212-224. <https://doi.org/10.1037/a0025823>

- Perry, C., & Long, H. (2022). What Is Going on with Visual Attention in Reading and Dyslexia? A Critical Review of Recent Studies. *Brain Sciences*, 12(1), 87. <https://doi.org/10.3390/brainsci12010087>
- Peter, B., Albert, A., & Gray, S. (2021). Spelling errors reveal underlying sequential and spatial processing deficits in adults with dyslexia. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 35(4), 310-339. <https://doi.org/10.1080/02699206.2020.1780322>
- Peter, B., Albert, A., Panagiotides, H., & Gray, S. (2021). Sequential and spatial letter reversals in adults with dyslexia during a word comparison task : Demystifying the “was saw” and “db” myths. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 35(4), 340-367. <https://doi.org/10.1080/02699206.2019.1705916>
- Peter, B., Lancaster, H., Vose, C., Middleton, K., & Stoel-Gammon, C. (2018). Sequential processing deficit as a shared persisting biomarker in dyslexia and childhood apraxia of speech. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 32(4), 316-346. <https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1375560>
- Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2012). Developmental dyslexia. *The Lancet*, 379(9830), 1997-2007. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60198-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60198-6)
- Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2015). Developmental Dyslexia. *Annual Review of Clinical Psychology*, 11(1), 283-307. <https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-032814-112842>
- Peyrin, C., Lallier, M., Démonet, J. F., Pernet, C., Baciú, M., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2012). Neural dissociation of phonological and visual attention span disorders in developmental dyslexia : fMRI evidence from two case reports. *Brain and Language*, 120(3), 381-394. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.12.015>
- Portrat, S., Camos, V., & Barrouillet, P. (2009). Working memory in children : A time-constrained functioning similar to adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102(3), 368-374. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.05.005>
- Ram-Tsur, R., Faust, M., & Zivotofsky, A. Z. (2006). Sequential processing deficits of reading disabled persons is independent of inter-stimulus interval. *Vision Research*, 46(22), 3949-3960. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.07.001>
- Ram-Tsur, R., Faust, M., & Zivotofsky, A. Z. (2008). Poor Performance on Serial Visual Tasks in Persons With Reading Disabilities : Impaired Working Memory? *Journal of Learning Disabilities*, 41(5), 437-450. <https://doi.org/10.1177/0022219408321141>
- Ramus, F. (2001). Talk of two theories. *Nature*, 412(6845), 393-394. <https://doi.org/10.1038/35086683>
- Ramus, F. (2003). Theories of developmental dyslexia : Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain*, 126(4), 841-865. <https://doi.org/10.1093/brain/awg076>

- Ramus, F., & Ahissar, M. (2012). Developmental dyslexia : The difficulties of interpreting poor performance, and the importance of normal performance. *Cognitive Neuropsychology*, 29(1-2), 104-122. <https://doi.org/10.1080/02643294.2012.677420>
- Ramus, F., Marshall, C. R., Rosen, S., & van der Lely, H. K. J. (2013). Phonological deficits in specific language impairment and developmental dyslexia : Towards a multidimensional model. *Brain*, 136(2), 630-645. <https://doi.org/10.1093/brain/aws356>
- Ramus, F., Pidgeon, E., & Frith, U. (2003). The relationship between motor control and phonology in dyslexic children : Motor control and phonology in dyslexic children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(5), 712-722. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00157>
- Ramus, F., Rosen, S., Dakin, S. C., Day, B. L., Castellote, J. M., White, S., & Frith, U. (2003). Theories of developmental dyslexia : Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain: A Journal of Neurology*, 126(Pt 4), 841-865. <https://doi.org/10.1093/brain/awg076>
- Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What Phonological Deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), 129-141. <https://doi.org/10.1080/17470210701508822>
- Rasoulzadeh, V., Sahan, M. I., Van Dijck, J.-P., Abrahamse, E., Marzecova, A., Verguts, T., & Fias, W. (2021). Spatial Attention in Serial Order Working Memory : An EEG Study. *Cerebral Cortex*, 31(5), 2482-2493. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa368>
- Raven, J. C., Court, J. H., & Raven, J. (1998). *Colored progressive matrices* (Oxford Psychologists Press).
- Reiter, A., Tucha, O., & Lange, K. W. (2005). Executive functions in children with dyslexia. *Dyslexia*, 11(2), 116-131. <https://doi.org/10.1002/dys.289>
- Romani, C., Tsouknida, E., & Olson, A. (2015). Encoding order and developmental dyslexia : A family of skills predicting different orthographic components. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(1), 99-128. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.938666>
- Roy, A., Fournet, N., Roulin, J.-L., & Le Gall, D. (2014). *BRIEF-inventaire d'évaluation comportementale des fonctions exécutives, adaptation française*. Hogrefe.
- Saint-Aubin, J., & Poirier, M. (1999). Semantic Similarity and Immediate Serial Recall : Is There a Detrimental Effect on Order Information? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 52(2), 367-394. <https://doi.org/10.1080/027249899391115>
- Saksida, A., Iannuzzi, S., Bogliotti, C., Chaix, Y., Démonet, J.-F., Bricout, L., Billard, C., Nguyen-Morel, M.-A., Le Heuzey, M.-F., Soares-Boucaud, I., George, F., Ziegler, J. C., & Ramus, F. (2016). Phonological skills, visual attention span, and visual stress in developmental dyslexia. *Developmental Psychology*, 52(10), 1503-1516. <https://doi.org/10.1037/dev0000184>



- Sala, G., & Gobet, F. (2017). Working memory training in typically developing children : A meta-analysis of the available evidence. *Developmental Psychology*, 53(4), 671-685. <https://doi.org/10.1037/dev0000265>
- Sala, G., & Gobet, F. (2020). Working memory training in typically developing children : A multilevel meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27(3), 423-434. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01681-y>
- Schraeyen, K., Geudens, A., Ghesquière, P., Van der Elst, W., & Sandra, D. (2017). Poor performance on the retention of phonemes' serial order in short-term memory reflects young children's poor reading skills. *The Mental Lexicon*, 12(1), 129-158. <https://doi.org/10.1075/ml.12.1.06sch>
- Schraeyen, K., Van Der Elst, W., Geudens, A., Ghesquière, P., & Sandra, D. (2019). Short-term memory problems for phonemes' serial order in adults with dyslexia : Evidence from a different analysis of the Nonword repetition task. *Applied Psycholinguistics*, 40(03), 613-644. <https://doi.org/10.1017/S0142716418000759>
- Schuchardt, K., Maehler, C., & Hasselhorn, M. (2008). Working Memory Deficits in Children With Specific Learning Disorders. *Journal of Learning Disabilities*, 41(6), 514-523. <https://doi.org/10.1177/0022219408317856>
- Schulte-Körne, G. (2010). The Prevention, Diagnosis, and Treatment of Dyslexia. *Deutsches Ärzteblatt international*. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2010.0718>
- Sela, I., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., & Onaral, B. (2012). A Working Memory Deficit among Dyslexic Readers with No Phonological Impairment as Measured Using the N-Back Task : An fNIR Study. *PLoS ONE*, 7(11), e46527. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046527>
- Shiran, A., & Breznitz, Z. (2011). The effect of cognitive training on recall range and speed of information processing in the working memory of dyslexic and skilled readers. *Journal of Neurolinguistics*, 24(5), 524-537. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2010.12.001>
- Sireteanu, R., Goebel, C., Goertz, R., Werner, I., Nalewajko, M., & Thiel, A. (2008). Impaired Serial Visual Search in Children with Developmental Dyslexia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145(1), 199-211. <https://doi.org/10.1196/annals.1416.021>
- Smalle, E. H. M., Szmalec, A., Bogaerts, L., Page, M. P. A., Narang, V., Misra, D., Araújo, S., Lohagan, N., Khan, O., Singh, A., Mishra, R. K., & Huettig, F. (2019). Literacy improves short-term serial recall of spoken verbal but not visuospatial items – Evidence from illiterate and literate adults. *Cognition*, 185, 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.01.012>
- Smith-Spark, J. H., & Fisk, J. E. (2007). Working memory functioning in developmental dyslexia. *Memory*, 15(1), 34-56. <https://doi.org/10.1080/09658210601043384>

- Snowling, M., Chiat, S., & Hulme, C. (1991). Words, nonwords, and phonological processes : Some comments on Gathercole, Willis, Emslie, and Baddeley. *Applied Psycholinguistics*, 12(3), 369-373. <https://doi.org/10.1017/S0142716400009279>
- Soroli, E., Szenkovits, G., & Ramus, F. (2010). Exploring dyslexics' phonological deficit III : Foreign speech perception and production. *Dyslexia*, 16(4), 318-340. <https://doi.org/10.1002/dys.415>
- Spanoudis, G. C., Papadopoulou, T. C., & Spyrou, S. (2019). Specific Language Impairment and Reading Disability : Categorical Distinction or Continuum? *Journal of Learning Disabilities*, 52(1), 3-14. <https://doi.org/10.1177/0022219418775111>
- Spencer-Smith, M., & Klingberg, T. (2015). Benefits of a Working Memory Training Program for Inattention in Daily Life : A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS ONE*, 10(3), e0119522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119522>
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchennec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). French normative data on reading and related skills from EVALEC, a new computerized battery of tests (end Grade 1, Grade 2, Grade 3, and Grade 4). *European Review of Applied Psychology*, 55(3), 157-186. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2004.11.002>
- Staels, E., & Van Den Broeck, W. (2014). Order short-term memory is not impaired in dyslexia and does not affect orthographic learning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00732>
- Stanford, E., Durrleman, S., & Delage, H. (2019). The Effect of Working Memory Training on a Clinical Marker of French-Speaking Children With Developmental Language Disorder. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 28(4), 1388-1410. [https://doi.org/10.1044/2019\\_AJSLP-18-0238](https://doi.org/10.1044/2019_AJSLP-18-0238)
- Swanson, H. L., Kehler, P., & Jerman, O. (2010). Working Memory, Strategy Knowledge, and Strategy Instruction in Children With Reading Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 43(1), 24-47. <https://doi.org/10.1177/0022219409338743>
- Swanson, H. L., Xinhua Zheng, & Jerman, O. (2009). Working Memory, Short-Term Memory, and Reading Disabilities : A Selective Meta-Analysis of the Literature. *Journal of Learning Disabilities*, 42(3), 260-287. <https://doi.org/10.1177/0022219409331958>
- Szenkovits, G., & Ramus, F. (2005). Exploring dyslexics' phonological deficit I : Lexical vs sub-lexical and input vs output processes. *Dyslexia*, 11(4), 253-268. <https://doi.org/10.1002/dys.308>
- Szmalc, A., Loncke, M., Page, M. P. A., & Duyck, W. (2011). Order or disorder? Impaired Hebb learning in dyslexia. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 37(5), 1270-1279. <https://doi.org/10.1037/a0023820>
- Tallal, P. (1984). Temporal or phonetic processing deficit in dyslexia? That is the question. *Applied Psycholinguistics*, 5(2), 167-169. <https://doi.org/10.1017/S0142716400004963>

- Taran, N., Farah, R., DiFrancesco, M., Altaye, M., Vannest, J., Holland, S., Rosch, K., Schlaggar, B. L., & Horowitz-Kraus, T. (2022). The role of visual attention in dyslexia: Behavioral and neurobiological evidence. *Human Brain Mapping, 43*(5), 1720-1737. <https://doi.org/10.1002/hbm.25753>
- Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabrieli, J. D. E. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: Evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 100*(5), 2860-2865. <https://doi.org/10.1073/pnas.0030098100>
- Thomson, J. M., & Goswami, U. (2008). Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: Auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology-Paris, 102*(1-3), 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.007>
- Toffalini, E., Tomasi, E., Albano, D., & Cornoldi, C. (2018). The effects of the constancy of location and order in working memory visual–phonological binding of children with dyslexia. *Child Neuropsychology, 24*(5), 671-685. <https://doi.org/10.1080/09297049.2017.1329411>
- Tubach, J. L., & Boë, L. J. (1990). *Un corpus de transcription phonétique* (Telecom).
- Valdois, S., Guinet, E., & EMBS, J.-L. (2017). *EVADYS*. HappyNeuron.
- Vallat, C., Azouvi, P., Hardisson, H., Meffert, R., Tessier, C., & Pradat-Diehl, P. (2005). Rehabilitation of verbal working memory after left hemisphere stroke. *Brain Injury, 19*(13), 1157-1164. <https://doi.org/10.1080/02699050500110595>
- Vallat-Azouvi, C., Pradat-Diehl, P., & Azouvi, P. (2009). Rehabilitation of the central executive of working memory after severe traumatic brain injury: Two single-case studies. *Brain Injury, 23*(6), 585-594. <https://doi.org/10.1080/02699050902970711>
- Van Breukelen, G. J. P., & Vlaeyen, J. W. S. (2005). Norming clinical questionnaires with multiple regression: The Pain Cognition List. *Psychological Assessment, 17*(3), 336-344. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.17.3.336>
- Van Dijck, J.-P., Abrahamse, E. L., Acar, F., Ketels, B., & Fias, W. (2014). A Working Memory Account of the Interaction between Numbers and Spatial Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 67*(8), 1500-1513. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.903984>
- Van Dijck, J.-P., Abrahamse, E. L., Majerus, S., & Fias, W. (2013). Spatial Attention Interacts With Serial-Order Retrieval From Verbal Working Memory. *Psychological Science, 24*(9), 1854-1859. <https://doi.org/10.1177/0956797613479610>
- Van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2011). A working memory account for spatial–numerical associations. *Cognition, 119*(1), 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.12.013>

- Varvara, P., Varuzza, C., Sorrentino, A. C. P., Vicari, S., & Menghini, D. (2014). Executive functions in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00120>
- Vecera, S. P., & Rizzo, M. (2003). Spatial attention : Normal processes and their breakdown. *Neurologic Clinics*, 21(3), 575-607. [https://doi.org/10.1016/S0733-8619\(02\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0733-8619(02)00103-2)
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia) : What have we learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(1), 2-40. <https://doi.org/10.1046/j.0021-9630.2003.00305.x>
- 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. <https://doi.org/10.1037/a0035779>
- Vicari, S. (2005). Do children with developmental dyslexia have an implicit learning deficit? *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 76(10), 1392-1397. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2004.061093>
- Vieira, S., Quercia, P., Bonnetblanc, F., & Michel, C. (2013). Space representation in children with dyslexia and children without dyslexia : Contribution of line bisection and circle centering tasks. *Research in Developmental Disabilities*, 34(11), 3997-4008. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.08.031>
- Von Wirth, E., Willems, S., Döpfner, M., & Kohl, L. T. (2023). Effectiveness of videoconference-delivered psychotherapy for children, adolescents, and their parents : A meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 1357633X231199784. <https://doi.org/10.1177/1357633X231199784>
- von Bastian, C. C., & Oberauer, K. (2014). Effects and mechanisms of working memory training : A review. *Psychological Research*, 78(6), 803-820. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0524-6>
- Waldie, K. E., & Hausmann, M. (2010). Right fronto-parietal dysfunction in children with ADHD and developmental dyslexia as determined by line bisection judgements. *Neuropsychologia*, 48(12), 3650-3656. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.08.023>
- Wang, S., & Gathercole, S. E. (2013). Working memory deficits in children with reading difficulties : Memory span and dual task coordination. *Journal of Experimental Child Psychology*, 115(1), 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.11.015>
- Wang, X., Xuan, Y., & Jarrold, C. (2016). Using a Process Dissociation Approach to Assess Verbal Short-Term Memory for Item and Order Information in a Sample of Individuals with a Self-Reported Diagnosis of Dyslexia. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00208>

- Weiss, D. J., Gerfen, C., & Mitchel, A. D. (2010). Colliding cues in word segmentation : The role of cue strength and general cognitive processes. *Language and Cognitive Processes*, 25(3), 402-422. <https://doi.org/10.1080/01690960903212254>
- Windfuhr, K. L., & Snowling, M. J. (2001). The Relationship between Paired Associate Learning and Phonological Skills in Normally Developing Readers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80(2), 160-173. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2625>
- Wokuri, S., Gonthier, C., Marec-Breton, N., & Majerus, S. (2023). Heterogeneity of short-term memory deficits in children with dyslexia. *Dyslexia*, dys.1749. <https://doi.org/10.1002/dys.1749>
- Xiao, P., Zhu, K., Liu, Q., Xie, X., Jiang, Q., Feng, Y., Wu, X., Tang, J., & Song, R. (2022). Association between developmental dyslexia and anxiety/depressive symptoms among children in China : The chain mediating of time spent on homework and stress. *Journal of Affective Disorders*, 297, 495-501. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.10.120>
- Yang, J., Peng, J., Zhang, D., Zheng, L., & Mo, L. (2017). Specific effects of working memory training on the reading skills of Chinese children with developmental dyslexia. *PLOS ONE*, 12(11), e0186114. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186114>
- Zachary, R. A., & Gorsuch, R. L. (1985). Continuous norming : Implications for the WAIS-R. *Journal of Clinical Psychology*, 41(1), 86-94. [https://doi.org/10.1002/1097-4679\(198501\)41:1<86::AID-JCLP2270410115>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1097-4679(198501)41:1<86::AID-JCLP2270410115>3.0.CO;2-W)
- Zoubinetzky, R., Bielle, F., & Valdois, S. (2014). New Insights on Developmental Dyslexia Subtypes : Heterogeneity of Mixed Reading Profiles. *PLoS ONE*, 9(6), e99337. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099337>
- Zoubinetzky, R., Collet, G., Nguyen-Morel, M.-A., Valdois, S., & Serniclaes, W. (2019). Remediation of Allophonic Perception and Visual Attention Span in Developmental Dyslexia : A Joint Assay. *Frontiers in Psychology*, 10, 1502. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01502>



# ANNEXES

## Annexe 1 : Descriptifs des tâches d'évaluation des compétences phonologiques et de la mémoire de travail

### Compétences phonologiques

- **Discrimination de paires minimales** : le participant doit déterminer si les deux syllabes qu'il entend sont identiques ou non. La moitié des paires sont identiques, et l'autre moitié se distingue par le VOT (voice onset time – délai de voisement) ou 1 autre trait articulatoire/acoustique. La spécificité de cette tâche est de comparer des stimuli qui sont présentés soit en version standard, soit avec une énonciation plus rapide, raccourcissant les changements rapides des formants.
- **Suppression initiale du phonème ou de la syllabe** : l'enfant doit supprimer la première syllabe ou le premier phonème d'un non-mot.
- **Répétition de mots** : le participant doit répéter le mot qu'il vient d'entendre.
- **Répétition de non-mots** : l'enfant doit répéter le non-mot qu'il vient d'entendre.

### Mémoire de travail information « item »

- **Rappel sériel immédiat de mot et de non-mots** : le participant doit rappeler des listes de mots et de non-mots en respectant l'ordre de présentation des items. Les listes présentées sont composées de 2 à 5 items. Il y a 4 listes de mots/non-mots par nombre d'items. Un premier score est établi à partir du nombre d'items rappelés dans l'ordre de présentation. Un second score est déterminé à partir du nombre d'item rappelés indépendamment de l'ordre de présentation
- **Répétition différée de non-mots** : l'enfant doit répéter des non-mots unisyllabiques après un bref délai comportant une tâche interférente verbale. Cette tâche maximise la rétention au niveau de l'information « item » phonologique, et minimise les aspects séquentiels car tous les non-mots ont la même structure unisyllabique consonne-voyelle-consonne. La VD est le nombre de non-mots répétés correctement.

### Mémoire de travail information « ordre sériel »

- **Reconstruction de l'ordre sériel de chiffres** : Il est demandé à l'enfant de remettre les séries de chiffres dans l'ordre après leur présentation. Il dispose de petits cartons pour faire cela numérotés de 1 à 7. Les séries présentées sont composées de 4 à 7 chiffres.
- **Reconstruction de l'ordre sériel de symboles** : On demande aux participants de remettre les séries de symboles dans l'ordre après leur présentation sur l'écran. Pour cela, les enfants disposent de petits cartons avec les symboles. Les séries présentées sont composées de 3 à 7 symboles. Les VD sont le nombre de séquences reproduites correctement et le nombre de positions de symboles correctement reproduites (en fonction du nombre de symboles à rappeler).

### Contrôle attentionnel

- **Empan de chiffres avec jugement spatial** : le participant doit rappeler des séries de chiffres présentées visuellement sur l'écran (empans de chiffres). Entre chaque chiffre, l'enfant réalise la tâche de jugement spatial décrite précédemment durant 8 secondes. Le nombre de chiffres à mémoriser augmente progressivement (2 chiffres, 3 chiffres, 4 chiffres, 5 chiffres). Il y a 4 essais par série d'empan, ce qui correspond à un total de 16 essais. Avant le test, il y a un exemple de « jugement spatial » (30 essais), puis un exemple « d'empan de chiffres avec jugement spatial » (4 essais). Dans le test, chaque série débute par un écran « condition » qui indique, pendant 2000 ms, la longueur de la série à mémoriser (ex : « 3 chiffres ») et la discriminabilité entre les positions des carrés (« carrés proches » ou « carrés éloignés »). Après un délai de 500 ms, un point de fixation est au centre de l'écran pendant 750 ms et suivi d'un délai de 500 ms. Ensuite, le premier chiffre à mémoriser apparaît à l'écran pendant 1500 ms. Après un délai post-chiffre de 500 ms, chacun des huit carrés apparaît successivement pendant 666 ms et est suivi d'un délai post-stimulus de 334 ms, pour un total de 1000 ms par stimulus. Ainsi, l'intervalle inter-chiffres est maintenu constant à 8500 ms (500 ms de délai post-chiffre + 8 x 1000 ms). Après le dernier des huit délais post-stimulus, le second chiffre apparaît pendant 1500 ms et ainsi de suite jusqu'à la fin de la série. A la fin de chaque série, le mot « Rappel » reste affiché à l'écran jusqu'à la réponse de l'enfant.



- **Report partiel de la batterie Evadys (Valdois et al., 2017)** : Il s'agit de présenter des séquences de lettres pendant de 200 ms au centre de l'écran d'un ordinateur. Une barre verticale est présentée aléatoirement en-dessous d'une lettre immédiatement après disparition de la séquence, avec pour consigne de ne dénommer que la lettre indiquée.

## **Annexe 2 : Procédures détaillées de la remédiation de la mémoire de travail de l'ordre sériel initialement prévue en présentiel**

Il est prévu que chaque séance dure une heure et soit divisée en deux parties de 30 minutes (cf. Description détaillée).

L'objectif de cet entraînement est d'amener l'enfant à développer une stratégie de codage spatial des informations en mémoire de travail de l'ordre sériel. Il sera ainsi proposé à l'enfant de se représenter mentalement les différents items de gauche à droite sur un chemin bordé de 6 images, afin que l'ordre des informations à mémoriser soit associé à une position. Pour arriver à cet objectif, plusieurs étapes seront proposées à l'enfant.

### **Phase 1 : Entraînement association ordre-position**

L'objectif de cette première phase est que l'enfant puisse se familiariser avec les associations ordre-position afin que cette stratégie soit mobilisable pour l'entraînement de MDT de l'ordre sériel.

#### **1<sup>ère</sup> partie de la séance : Reconnaissance**

On demande à l'enfant de déterminer si la série de chiffres présentée auditivement par l'ordinateur est dans le même ordre que la série cible présentée initialement. Pendant que les chiffres sont énoncés, l'enfant dispose sur le chemin des petits cartons avec les chiffres concernés. Ensuite, une série de chiffres est énoncée et l'enfant doit déterminer s'il s'agit de la même série (du même ordre) que celle énoncée initialement. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

#### **2<sup>ème</sup> partie de la séance : Reconstruction**

On demande à l'enfant de remettre les séries de chiffres dans l'ordre après leur présentation auditive par l'ordinateur. Pendant que les chiffres sont énoncés, l'enfant dispose sur le chemin, des petits cartons avec les chiffres concernés. Ensuite, il est demandé à l'enfant de disposer d'autres petits cartons numérotés dans l'ordre dans lequel il a entendu les chiffres. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

## **Phase 2 : Apprentissage codage spatial en mémoire de travail de l'ordre sériel avec des jetons**

A ce stade, l'enfant devrait être davantage familiarisé avec l'association ordre-position. Il va donc être entraîné au codage spatial de l'information « ordre sériel » en mémoire de travail grâce à un support visuel (chemin organisé de gauche à droite).

### **1<sup>ère</sup> partie de la séance : Reconnaissance**

On demande à l'enfant de déterminer si la série de chiffres présentée auditivement par l'ordinateur est dans le même ordre que la série cible présentée initialement. Pendant que les chiffres sont énoncés, l'enfant dispose sur le chemin des jetons. Une série de chiffres est énoncée et l'enfant doit déterminer s'il s'agit de la même série (du même ordre) que celle énoncée initialement. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

### **2<sup>ème</sup> partie de la séance : Reconstruction**

On demande à l'enfant de remettre les séries de chiffres dans l'ordre après leur présentation auditive par l'ordinateur. Pendant que les chiffres sont présentés, l'enfant dispose sur le chemin des jetons. Ensuite, il est demandé à l'enfant de disposer des petits cartons numérotés dans l'ordre dans lequel il a entendu les chiffres. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

## **Phase 3 : Entraînement codage spatial en mémoire de travail de l'ordre sériel sans les jetons**

Dans cette phase de l'entraînement, il est demandé à l'enfant de se représenter mentalement les chiffres sur le chemin disposé devant lui, afin de s'appuyer davantage sur son imagerie mentale.

### **1<sup>ère</sup> partie de la séance : Reconnaissance**

On demande à l'enfant de déterminer si la série de chiffres présentée auditivement par l'ordinateur est dans le même ordre que la série cible présentée initialement. Pendant que les chiffres sont présentés, il est demandé à l'enfant de se représenter mentalement les chiffres sur le chemin qui est posé devant lui. Une série de chiffres est énoncée et l'enfant doit

déterminer s'il s'agit de la même série (du même ordre) que celle énoncée initialement. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

### **2<sup>ème</sup> partie de la séance : Reconstruction**

On demande à l'enfant de remettre les séries de chiffres dans l'ordre après leur présentation auditive par l'ordinateur. Pendant que les chiffres sont présentés, il est demandé à l'enfant de se représenter mentalement les chiffres sur le chemin qui est posé devant lui. Ensuite, il est demandé à l'enfant de disposer des petits cartons numérotés dans l'ordre dans lequel il a entendu les chiffres. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

### **Phase 4 : Entraînement codage spatial en mémoire de travail de l'ordre sériel sans le chemin**

L'objectif de cette phase est que l'enfant automatise la stratégie de codage spatial de l'information « ordre sériel » sans s'appuyer sur un support visuel. Il s'agira pour l'enfant de se représenter mentalement le chemin mais également les chiffres énoncés.

### **1<sup>ère</sup> partie de la séance : Reconnaissance**

On demande à l'enfant de déterminer si la série de chiffres présentée auditivement par l'ordinateur est dans le même ordre que la série cible présentée initialement. Pendant que les chiffres sont présentés, il est demandé à l'enfant de se représenter mentalement les chiffres sur le chemin (le chemin n'est plus visible). Une série de chiffres est énoncée et l'enfant doit déterminer s'il s'agit de la même série (du même ordre) que celle énoncée initialement. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

### **2<sup>ème</sup> partie de la séance : Reconstruction**

On demande à l'enfant de remettre les séries de chiffres dans l'ordre après leur présentation auditive par l'ordinateur. Pendant que les chiffres sont présentés, il est demandé à l'enfant de se représenter mentalement les chiffres sur le chemin (le chemin n'est plus visible). Ensuite, il est demandé à l'enfant de disposer des petits cartons numérotés dans l'ordre dans lequel il a entendu les chiffres. Le nombre de chiffres évoluera progressivement de 4 chiffres à 6 chiffres.

### **Annexe 3 : Procédures détaillées de la remédiation de la mémoire de travail de l'item phonologique initialement prévue en présentiel**

L'objectif de cet entraînement est d'amener l'enfant à développer une stratégie de codage visuel des informations phonologiques en MDT de l'item. Il sera ainsi proposé à l'enfant de se représenter mentalement un visage en train d'articuler les différentes syllabes des items à mémoriser. Pour arriver à cet objectif, plusieurs étapes seront proposées à l'enfant.

Il est prévu que chaque séance dure une heure et soit divisée en deux parties de 30 minutes (cf. Description détaillée).

#### **Phase 1 : Entraînement association son-articulation**

L'objectif de cette première phase est que l'enfant puisse se familiariser avec les associations sons-articulation afin que cette stratégie soit mobilisable pour l'entraînement de mémoire de travail de l'item phonologique.

##### **1<sup>ère</sup> partie de la séance**

L'enfant entend un non-mot monosyllabique avec un visage en train de produire l'articulation sur l'écran. Le même non-mot est proposé avec un visage en train d'articuler et l'enfant doit dire si l'articulation est congruente, autrement dit si elle correspond à celle représentée initialement. Dans les cas non congruents, la bonne association est à nouveau montrée.

##### **2<sup>ème</sup> partie de la séance**

Après une tâche interférente, on demande à l'enfant de déterminer si le non-mot présenté auditivement par l'ordinateur est identique à celui présenté précédemment. Pendant que le non-mot cible est énoncé, l'enfant voit apparaître sur l'écran un visage qui articule ce non-mot. Il est demandé à l'enfant de répéter ce non-mot le plus de fois possible devant un miroir pendant 6 secondes, jusqu'à ce qu'un calcul simple à résoudre apparaisse sur l'écran (ex : 3 + 1). Ensuite, un non-mot est énoncé avec un visage en train d'articuler et l'enfant doit déterminer s'il s'agit du même non-mot que celui énoncé initialement.

Dans ce cadre, la stratégie de récapitulation articulatoire est proposée en association avec le codage visuel d'une information phonologique.

## **Phase 2 : Apprentissage codage visuel mémoire de travail de l'item (avec miroir mais sans visage articulé)**

A ce stade, l'enfant devrait être davantage familiarisé avec l'association son-articulation. Il va donc être entraîné au codage visuel de l'information phonologique, en utilisant une stratégie de récapitulation articulatoire supplée par un support visuel (articulation devant un miroir).

### **1<sup>ère</sup> partie de la séance : reconnaissance**

Après une tâche interférente, on demande à l'enfant de déterminer si le non-mot présenté auditivement par l'ordinateur est identique à celui présenté initialement. Une fois que le non-mot cible est énoncé, il est demandé à l'enfant de répéter ce non-mot le plus de fois possible devant un miroir pendant 6 secondes, jusqu'à ce qu'un calcul simple à résoudre apparaisse sur l'écran (ex :  $3 + 1$ ). Ensuite, un non-mot est énoncé et l'enfant doit déterminer s'il s'agit du même non-mot que celui énoncé initialement.

### **2<sup>ème</sup> partie de la séance : répétition**

L'enfant doit répéter un non-mot après un bref délai comportant une tâche interférente. Une fois que le non-mot cible est énoncé, il est demandé à l'enfant de répéter ce non-mot le plus de fois possible devant un miroir pendant 6 secondes, jusqu'à ce qu'un calcul simple à résoudre apparaisse sur l'écran (ex :  $3 + 1$ ). Ensuite, l'enfant doit rappeler le non-mot entendu initialement.

## **Phase 3 : entraînement de la mémoire de travail de l'item sans miroir**

Dans cette phase de l'entraînement, il est demandé à l'enfant de remplacer le support visuel (le miroir) par son imagerie mentale. Autrement dit, l'enfant doit se représenter mentalement l'articulation du non-mot pendant qu'il récapitule.

### **1<sup>ère</sup> partie de la séance : Reconnaissance**

Après une tâche interférente, on demande à l'enfant de déterminer si le non-mot présenté auditivement par l'ordinateur est identique à celui présenté initialement. Une fois que le non-mot cible est énoncé par l'ordinateur, il est demandé à l'enfant de répéter ce non-mot le plus de fois possible, en se représentant l'articulation mentalement, jusqu'à ce qu'un calcul simple

à résoudre apparaisse sur l'écran (ex : 3 + 1). Un non-mot est énoncé et l'enfant doit déterminer s'il s'agit du même non-mot que celui énoncé initialement.

### **2<sup>ème</sup> partie de la séance : Répétition**

L'enfant doit répéter un non-mot après un bref délai comportant une tâche interférente. Une fois que le non-mot cible est énoncé par l'ordinateur, il est demandé à l'enfant de répéter ce non-mot le plus de fois possible, en se représentant l'articulation mentalement, jusqu'à ce qu'un calcul simple à résoudre apparaisse sur l'écran (ex : 3 + 1). Ensuite, l'enfant doit rappeler le non-mot entendu initialement.

### **Etape 4 : entraînement de la mémoire de travail de l'item en réduisant progressivement le délai de récapitulation articulatoire**

L'objectif de cette phase est que l'enfant automatise la stratégie de codage visuel de l'information « item phonologique » en se représentant mentalement l'articulation des non-mots. Il s'agira de réduire progressivement le temps de récapitulation articulatoire, de manière à ce que l'enfant optimise sa stratégie de codage visuel, en se représentant mentalement l'articulation des non-mots de plus en plus rapidement.

### **1<sup>ère</sup> partie de la séance**

Après une tâche interférente, on demande à l'enfant de déterminer si le non-mot présenté auditivement par l'ordinateur est identique à celui présenté initialement. Une fois que le non-mot cible est énoncé par l'ordinateur, il est demandé à l'enfant de répéter ce non-mot le plus de fois possible, en se représentant l'articulation mentalement, jusqu'à ce qu'il doive réaliser une tâche verbale interférente (compter à partir d'un chiffre donné). Un non-mot est énoncé et l'enfant doit déterminer s'il s'agit du même non-mot que celui énoncé initialement. Le délai de récapitulation articulatoire diminue progressivement au fur et à mesure des séances (4, 3, 2, 1 secondes).

### **2<sup>ème</sup> partie de la séance : Répétition**

L'enfant doit répéter un non-mot après un bref délai comportant une tâche interférente. Une fois que le non-mot cible est énoncé par l'ordinateur, il est demandé à l'enfant de répéter ce non-mot le plus de fois possible, en se représentant l'articulation mentalement, jusqu'à ce

qu'il doive réaliser une tâche verbale interférente (compter à partir d'un chiffre donné). Ensuite, l'enfant doit rappeler le non-mot entendu initialement. Le délai de récapitulation articulatoire diminue progressivement au fur et à mesure des séances (4, 3, 2, 1 secondes).



**Annexe 4 : Adaptations des tâches d'évaluation pour les lignes de base à distance (étude 3)**

Tâches	Adaptations
Reconstruction de l'ordre sériel de chiffres	Les cartes sont disposées dans microsoft power point (manipulation plus facile des cartes pour les enfants que sur word). L'enfant doit déplacer les cartes avec la souris pour les remettre dans l'ordre entendu.
Reconstruction de l'ordre sériel de symboles	Les cartes sont dans microsoft power point. L'enfant doit déplacer les cartes avec la souris pour les remettre dans l'ordre présenté.
Répétition différée de non-mots	La tâche sur open sésame est présentée à l'enfant avec TeamViewer en parallèle.
Rappel sériel immédiat de mots et de non-mots	La tâche est réalisée en appel vidéo via TeamViewer
Empans de chiffres directs	La tâche est réalisée en appel vidéo via TeamViewer
Empans de chiffres avec jugement spatial	La tâche est réalisée sur Open sésame en parallèle de TeamViewer
Calcul mental	La tâche est réalisée en appel vidéo via TeamViewer
Résolution de problèmes	La tâche est réalisée en appel vidéo via TeamViewer
MIM (Belec)	Les cartes sont affichées une par une à l'écran (sur power point) en parallèle de TeamViewer

---

**Titre : Déficiences de mémoire de travail et de mémoire à court terme dans la dyslexie : évaluation et remédiation****Mots clés :** Mémoire de travail, Dyslexie, Remédiation

**Résumé :** La dyslexie développementale est un trouble durable d'acquisition du langage écrit. Plusieurs études ont mis en évidence que les personnes dyslexiques présentaient des troubles de la mémoire de travail (MT). Le premier objectif de la thèse est de préciser la nature des déficits de MT chez les enfants dyslexiques. Le second objectif est d'étudier la potentielle efficacité d'une remédiation ciblée de la MT de l'ordre sériel et de l'item chez les enfants dyslexiques. Nous avons évalué les capacités de MT de l'ordre sériel et de l'item, les compétences phonologiques et le contrôle attentionnel chez des enfants dyslexiques et au développement typique. Une remédiation ciblant soit la MT de l'ordre sériel soit la MT de l'item a ensuite été proposée à quatre adolescents dyslexiques.

Nos résultats ont montré une hétérogénéité des profils de MT dans notre groupe d'enfants dyslexiques, avec une dissociation entre les troubles de la MT de l'item et de l'ordre sériel. De plus, ces déficits de MT n'étaient pas simplement la conséquence de difficultés attentionnelles ou phonologiques des enfants dyslexiques. En revanche, nos résultats suggèrent que leurs troubles phonologiques pourraient être consécutifs à leur déficit de MT de l'item. Par ailleurs, si certaines de nos données suggèrent des effets potentiels d'une remédiation ciblée de la MT de l'item et de l'ordre sériel, elles montrent également l'importance de mener d'autres études avant de pouvoir généraliser nos résultats.

---

**Title :** Working memory and short-term memory deficits in dyslexia: assessment and remediation**Keywords :** Working memory, Dyslexia, Remediation

**Abstract:** Dyslexia is a neurodevelopmental disorder of written language acquisition. Several studies have shown that dyslexic individuals have working memory (WM) deficits. The first aim of this thesis is to clarify the nature of WM deficits in dyslexic children. The second aim is to study the potential effectiveness of targeted remediation of serial order and item WM in dyslexic children. We assessed serial order and item WM abilities, phonological skills and attentional control in dyslexic and typically developing children. Remediation targeting either serial order WM or item WM was then proposed to four dyslexic adolescents.

Our results showed a heterogeneity of WM profiles in our group of dyslexic children, with a dissociation between item and serial order WM impairments. Moreover, these WM deficits were not merely the consequence of attentional or phonological difficulties in dyslexic children. On the other hand, our results suggest that dyslexic children's phonological difficulties could be consecutive to their item WM deficits. Furthermore, while some of our data suggest potential effects of targeted remediation of item WM and serial order, they also show the importance of conducting further studies before our results can be generalized.